4

Э. КОНЪ.
Проф. въ Страсбургѣ.

Г. ПУАНКАРЕ.
Членъ Парижской Академіи Наукъ.

272.

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ СЪ ТОЧКИ ЗРѢНІЯ ФИЗИКИ.

Переводъ подъ редакціей „Вѣстника Опытной Физики и Элементарной Математики“.

MATHESIS

1912.

http://mathesis.ru

Тип. Акц. Южно-Русскаго
Общества Печатнаго Дѣла,
Одесса, Пушкинская, №18.

Пространство и время съ точки зрѣнія физики.

Проф. Э. Кона.

Научно работать въ физикѣ — значитъ разыскивать въ явленіяхъ природы количественныя соотношенія и приводить эти послѣднія къ простѣйшему выраженію: первое есть задача экспериментатора, а второе — теоретика. Всѣ явленія протекаютъ въ пространствѣ и во времени. Мѣсто и время служатъ „независимыми перемѣнными“, а всѣ прочія величины мы стремимся представить въ функціи отъ нихъ. Поэтому первымъ условіемъ существованія физики, какъ науки, является возможность количественно выразить пространство и время. Что это выполнимо, — т. е. что каждому отрѣзку можно однозначнымъ образомъ приписать опредѣленное значеніе въ метрахъ, а каждому промежутку

http://mathesis.ru

времени — опредѣленное значеніе въ секундахъ, — кажется чѣмъ-то самоочевиднымъ. Однако, наука показала, что это не такъ, и вмѣстѣ съ тѣмъ наши понятія пространства и времени подверглись коренному измѣненію. Эта перемѣна во взглядахъ и составляетъ предметъ дальнѣйшаго изложенія.

http://mathesis.ru

1. Принципъ относительности въ механикѣ (Галилей-Ньютонъ).

Шаръ катится по палубѣ судна; что мы должны считать его скоростью? Скорость относительно судна? Но вѣдь судно само также движется. Скорость относительно земли? Но земля вѣдь также имѣетъ движеніе. Относительно солнца?—„неподвижныхъ" звѣздъ?—какого-то *x*, относительно котораго перемѣщаются неподвижныя звѣзды и о которомъ мы рѣшительно ничего не знаемъ? Эта послѣдняя скорость не имѣетъ никакого смысла, каждая изъ прочихъ имѣетъ опредѣленный смыслъ. Спрашивается, можно ли выдѣлить какую-либо опредѣленную систему, къ которой предпочтительно отнести движеніе, можно ли выдѣлить какую-либо опредѣленную скорость? На этотъ вопросъ долженъ

http://mathesis.ru

отвѣтить опытъ. Опытъ отвѣчаетъ: есть не одна такая система, но цѣлая группа системъ.

Заставимъ латунный обручъ вращаться вокругъ своего діаметра, — онъ сплющится. Уронимъ систему двухъ деревянныхъ дисковъ, соединенныхъ вертикальной спиральной пружиной, — пружина при паденіи сожмется. Повторимъ послѣдній опытъ, но постараемся при помощи тренія и надлежащаго противовѣса, достигнуть того, чтобы система опускалась съ возможно постоянной скоростью. Теперь пружина сохраняетъ такое же напряженіе, какъ и въ состояніи покоя. Два первыхъ опыта имѣли между собою то общее, что скорость движенія въ обоихъ случаяхъ въ теченіе опыта мѣнялась: въ первомъ опытѣ измѣнялось направленіе скорости, во второмъ — ея величина; движеніе было „ускореннымъ“. Въ третьемъ же опытѣ скорость оставалась постоянной какъ по направленію, такъ и по величинѣ: движеніе было „равномѣрнымъ“. Результатъ этихъ трехъ опытовъ мы можемъ, очевидно, выразить слѣдующимъ образомъ: упругое тѣло сохраняетъ постоянную форму какъ въ состояніи покоя относительно земли, такъ и въ состояніи покоя относительно системы, которая сама обладаетъ равномѣрнымъ движеніемъ относительно земли; оно, напротивъ, измѣняетъ свою форму въ состояніи покоя относительно системы, ко-

http://mathesis.ru

торая сама имѣетъ ускоренное движеніе относительно земли. Это можно выразить еще иначе: наблюдатель, заключенный въ одной оболочкѣ съ испытуемымъ тѣломъ, не будетъ замѣчать равномѣрнаго движенія, ускоренное же онъ будетъ замѣчать. То же самое вѣрно и относительно наблюденій, которыя онъ дѣлаетъ на самомъ себѣ: онъ чувствуетъ движеніе карусели, чувствуетъ, какъ лифтъ начинаетъ подыматься и останавливается, но совершенно не замѣчаетъ равномѣрнаго движенія лифта. Это вѣрно и въ самомъ общемъ случаѣ. Представимъ себѣ изслѣдователя, который наблюдаетъ въ окружающемъ его мірѣ, ограниченномъ какимъ-либо образомъ, любое число механическихъ фактовъ. Предположимъ, что онъ засыпаетъ, а его „міръ", который до сихъ поръ оставался въ покоѣ относительно нѣкоторой среды, приходитъ въ движеніе, и нашъ наблюдатель просыпается, когда это движеніе уже стало равномѣрнымъ: его новыя наблюденія будутъ одинаковы съ прежними, онъ не можетъ ничего узнать о томъ, что произошло во время его сна. Если же онъ былъ приведенъ въ ускоренное движеніе, напримѣръ, во вращеніе, то онъ замѣчаетъ, что произошла перемѣна. Если мы дадимъ ему возможность заглянуть во „внѣшній" міръ, то онъ на основаніи своихъ опытовъ придетъ къ слѣдующему заключенію:

http://mathesis.ru

физика его собственнаго міра остается неизмѣнной для всѣхъ состояній движенія, которыя отличаются одно отъ другого постоянной прямолинейной скоростью относительно внѣшняго міра; но она оказывается различной при различныхъ вращеніяхъ относительно внѣшняго міра. Въ послѣднемъ случаѣ онъ тоже не будетъ въ состояніи рѣшить, вращается ли его міръ относительно внѣшняго міра, который остается въ покоѣ, или же внѣшній міръ вращается въ противоположную сторону вокругъ его міра. На этотъ вопросъ нельзя дать отвѣта, такъ какъ вопросъ не имѣетъ смысла. Но его наблюденія получатъ *различную формулировку*, смотря по тому, считаетъ ли онъ покоющимся свой міръ или же внѣшній міръ; и часто оказывается, что одно изъ этихъ двухъ возможныхъ представленій отличается *простотой*, которую оно сообщаетъ связному выраженію опытовъ, такъ называемымъ физическимъ „законамъ“. Въ *этомъ* смыслѣ мы можемъ дать опредѣленіе „абсолютнаго“ вращательнаго движенія. Въ *этомъ* именно смыслѣ мы разсматриваемъ небо неподвижныхъ звѣздъ, какъ неподвижное, а землю, какъ вращающуюся равномѣрно вокругъ своей оси: только постановка вопроса даетъ намъ механику, которую можно практически провести. Но абсолютнаго равномѣрнаго *поступательнаго* дви-

http://mathesis.ru

женія мы никакимъ образомъ не можемъ опредѣлить. Двѣ равномѣрно движущіяся другъ относительно друга системы совершенно эквивалентны механически: сказать, что система A въ покоѣ, а система B движется, или сказать, что система B въ покоѣ, а система A движется, — это одно и то же. Въ частности, слѣдовательно, механически выдѣляется не система неподвижныхъ звѣздъ одна сама по себѣ, но вмѣстѣ съ ней вся группа всѣхъ тѣхъ системъ, которыя обладаютъ равномѣрнымъ движеніемъ относительно неподвижныхъ звѣздъ, или, какъ мы ее будемъ называть, вся „группа неподвижныхъ звѣздъ". Въ этомъ заключается „принципъ относительности" въ механикѣ, восходящей до Галилея и Ньютона.

http://mathesis.ru

2. Принципъ относительности въ электродинамикѣ (Лоренцъ-Эйнштейнъ).

Изслѣдователи всегда стремились распространить факты, найденные въ механикѣ, на прочія области физики, и возвести принципы механики на степень общихъ физическихъ принциповъ. Въ этомъ направленіи заходили настолько далеко, что считали послѣдней цѣлью физическаго изслѣдованія „свести всѣ наблюдаемыя явленія къ движенію частицъ, находящихся подъ дѣйствіемъ опредѣленныхъ силъ“ *). Это требованіе

*) Особенно яркое выраженіе эта мысль получила въ словахъ Лапласа объ „умѣ“, который зналъ бы положенія и скорости всѣхъ атомовъ вселенной въ нѣкоторый моментъ и всѣ дѣйствующія силы: такой умъ могъ бы вычислить изъ своей „міровой формулы“ все прошедшеее и будущее.

Переводч.

http://mathesis.ru

въ конечной инстанціи, очевидно, обращено къ природѣ: природа должна быть объяснима механически. Но это не въ нашей власти: мы можемъ ставить природѣ вопросы, но не можемъ отдавать ей приказаній. Однако, указанная идея имѣетъ право на существованіе, какъ руководящая нить для постановки цѣлесообразныхъ вопросовъ, какъ „рабочая гипотеза“; объ этомъ свидѣтельствуетъ исторія физики, такъ какъ на явленіяхъ движенія впервые были открыты многообъемлющія закономѣрности.

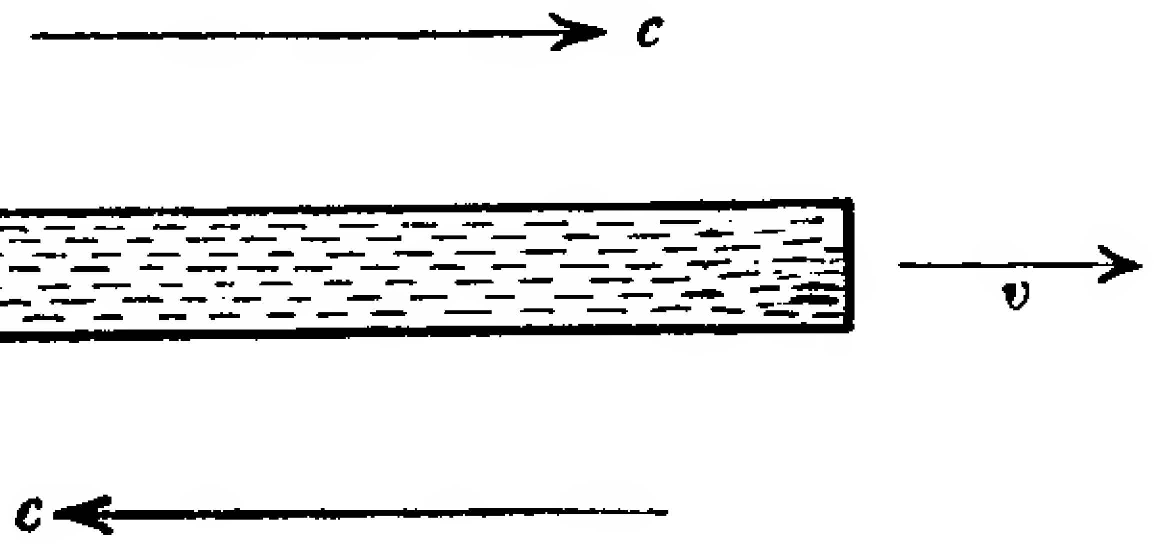
Къ великому удивленію изслѣдователей оказалось, что механическій принципъ относительности непримѣнимъ къ излученію — къ излученію и вмѣстѣ съ тѣмъ къ электродинамикѣ, такъ какъ послѣ работъ Генриха Герца мы можемъ считать вполнѣ установленнымъ, что распространеніе излученія есть электрическій процессъ. Рѣшающій опытъ, впервые поставленный Физо, состоитъ въ слѣдующемъ. Предположимъ, что въ жидкости, текущей съ постоянной скоростью, свѣтъ распространяется въ направленіи теченія. Согласно принципу относительности наблюдатель, уносимый теченіемъ, долженъ былъ бы констатировать такую же скорость распространенія, какъ если бы жидкость оставалась въ покоѣ. Слѣдовательно, наблюдатель, находящійся внѣ потока, долженъ былъ бы найти, что ско-

http://mathesis.ru

рость распространенія свѣта возросла на величину всей скорости жидкости (вспомнимъ шаръ, катящійся по палубѣ движущагося судна!). Это, однако, не имѣетъ мѣста: скорость распространенія свѣта увеличивается лишь на опредѣленную *дробную часть* скорости теченія. Эта дробь зависитъ отъ показателя преломленія жидкости. Предѣльный случай (въ дальнѣйшемъ мы однимъ лишь этимъ случаемъ будемъ заниматься подробнѣе) имѣетъ мѣсто для *газа*, который оптически почти не отличается отъ пустого пространства: въ этомъ случаѣ эта дробь равна *нулю*; и наблюдатель, стоящій извнѣ, убѣждается, что *для него* свѣтъ распространяется совершенно такъ, какъ если бы газъ оставался въ покоѣ. Или говоря точнѣе, т. е. ближе придерживаясь опыта: свѣтъ распространяется для наблюдателя съ одинаковой скоростью какъ въ направленіи теченія газа, такъ и въ противоположномъ. Онъ долженъ, слѣдовательно, заключить, что для *воображаемаго* наблюдателя, участвующаго въ движеніи газа, скорость свѣта уменьшается на величину всей его собственной скорости, когда онѣ обѣ направлены въ одну сторону, и увеличивается на такую же величину, когда онѣ направлены въ противоположныя стороны (фиг. 1).

http://mathesis.ru

Въ дѣйствительности мы сами постоянно находимся въ положеніи этого воображаемаго наблюдателя, движущагося вмѣстѣ съ воздушнымъ океаномъ. Въ своемъ годичномъ обращеніи вокругъ солнца земля движется съ скоростью, которую мы можемъ разсматривать въ продолженіе короткаго промежутка времени, какъ постоянную, и которая мало отличается отъ одной десятитысячной части скорости свѣта. Мы должны, слѣдовательно, быть въ состояніи распознавать движеніе земли на оптическихъ (вообще, электрическихъ) явленіяхъ, которыя совершаются на поверхности земли. Представимъ себѣ (фиг. 2) лучъ свѣта, идущій въ направленіи движенія земли отъ A къ B. Онъ пробѣгаетъ въ міровомъ пространствѣ б о л ѣ е д л и н н ы й путь, и соотвѣт-

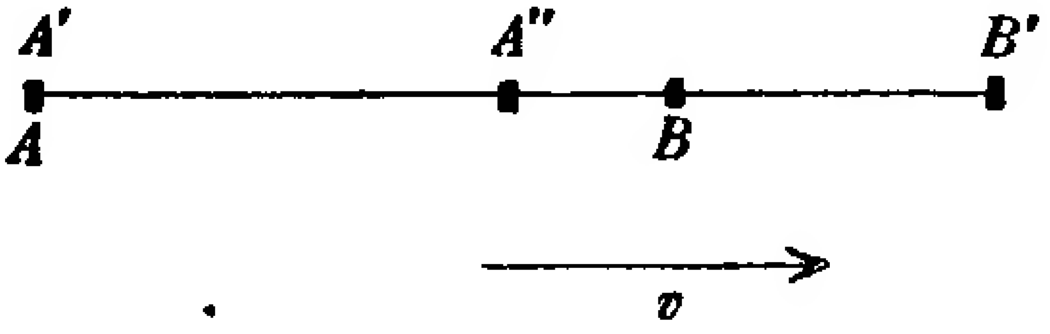


Фиг. 1.

Средняя стрѣлка указываетъ теченіе жидкости, верхняя и нижняя—скорость свѣта въ одномъ и въ другомъ направленіи.

http://mathesis.ru

ственно съ тѣмъ затрачиваетъ больше времени. Предположимъ, что онъ отражается отъ точки B (фиг. 2) и возвращается въ A. Теперь путь короче, чѣмъ BA; но, какъ показываетъ простое вычисленіе, путь въ общей сложности оказывается благодаря движенію земли удлиненнымъ. Предположимъ, что второй лучъ (фиг. 3) идетъ перпендикулярно къ движенію земли отъ A къ C и, отразившись отъ точки C, также возвращается въ A. Путь этого луча тоже удлинился; но, какъ показываетъ вычисле-

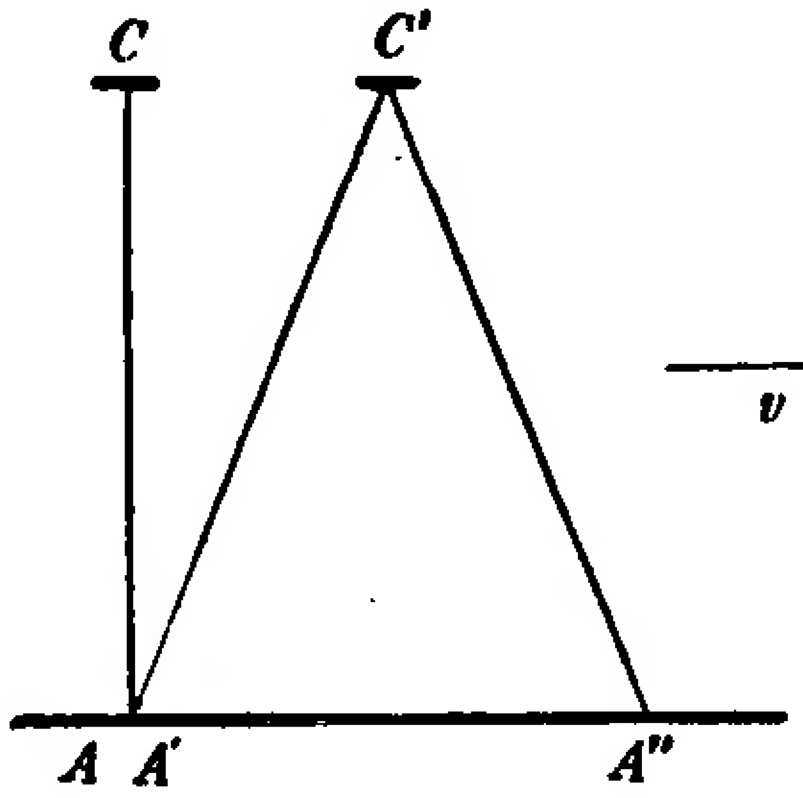


Фиг. 2.

ніе или чертежъ, онъ удлинился меньше, чѣмъ лучъ ABA. Итакъ, въ общей сложности, если лучи исходятъ одновременно изъ A къ B и C, и длины AB и AC въ точности равны между собой, то первый лучъ все же возвращается въ A позже, чѣмъ второй. Теперь повернемъ весь этотъ аппаратъ на 90°, такъ что плечо AC будетъ лежать въ направленіи движенія земли, а плечо AB перпендикулярно къ нему. Теперь лучъ AC прибываетъ позже. Слѣдовательно, поворотъ долженъ вызвать измѣненіе

http://mathesis.ru

наблюдаемаго явленія (интерференціоннаго изображенія *). Этотъ опытъ былъ произведенъ Майкельсономъ и Морлеемъ**). Длины были размѣрены такимъ образомъ, что вращеніе должно было дѣйствовать совершенно такъ, какъ удлиненіе свѣтового пути, круглымъ счетомъ, на двѣ десятитысячныя доли милли-



Фиг. 3.

метра. Съ совершенной точностью могли быть измѣрены удлиненія даже на одну двадцатую часть этой величины; но и этой двадцатой части

*) См. фиг. 4. У точки *A* находится стеклянная пластинка, которая разбиваетъ прибывающій лучъ на два луча по направленію къ *B* и *C* и вновь соединяетъ отраженные лучи.

**) См. подробнѣе О. Лоджъ, „Міровой эѳиръ", Одесса, „Mathesis", 1911 г.

http://mathesis.ru

не оказалось налицо. Послѣ этого опыта былъ произведенъ еще рядъ другихъ оптическихъ и электрическихъ опытовъ, которые должны были обнаружить на земныхъ явленіяхъ вліяніе поступательнаго движенія земли. Всѣ они безъ исключенія дали отрицательный результатъ, хотя *ожидаемый* эффектъ не могъ бы ускользнуть отъ наблюденія. Всѣ эти опыты протекали такъ, какъ если бы механическій принципъ относительности имѣлъ также силу и въ электродинамикѣ, — между тѣмъ какъ, согласно опыту *Физо*, онъ *не* имѣетъ мѣста. Въ этомъ заключается противорѣчіе, которое кажется неразрѣшимымъ.

Разрѣшеніе, которое въ настоящее время является господствующей рабочей гипотезой физиковъ*), состоитъ въ слѣдующемъ: принципъ относительности *вѣренъ* также въ оптическо-электрическихъ явленіяхъ. Наблюдатель, участвующій въ движеніи, никоимъ образомъ не можетъ обнаружить своего равномѣрнаго движенія. Въ электро-оптическихъ явленіяхъ, слѣдовательно, также не существуетъ выдѣляющейся системы сравненія, при помощи которой можно было бы опредѣлить „абсолютное движеніе“ и „абсолютный

*) Другое рѣшеніе дано авторомъ этой статьи; см. „Archives Neerlandaises“, 1900. Sitzungsberichte der Berliner Akademie, 1904.

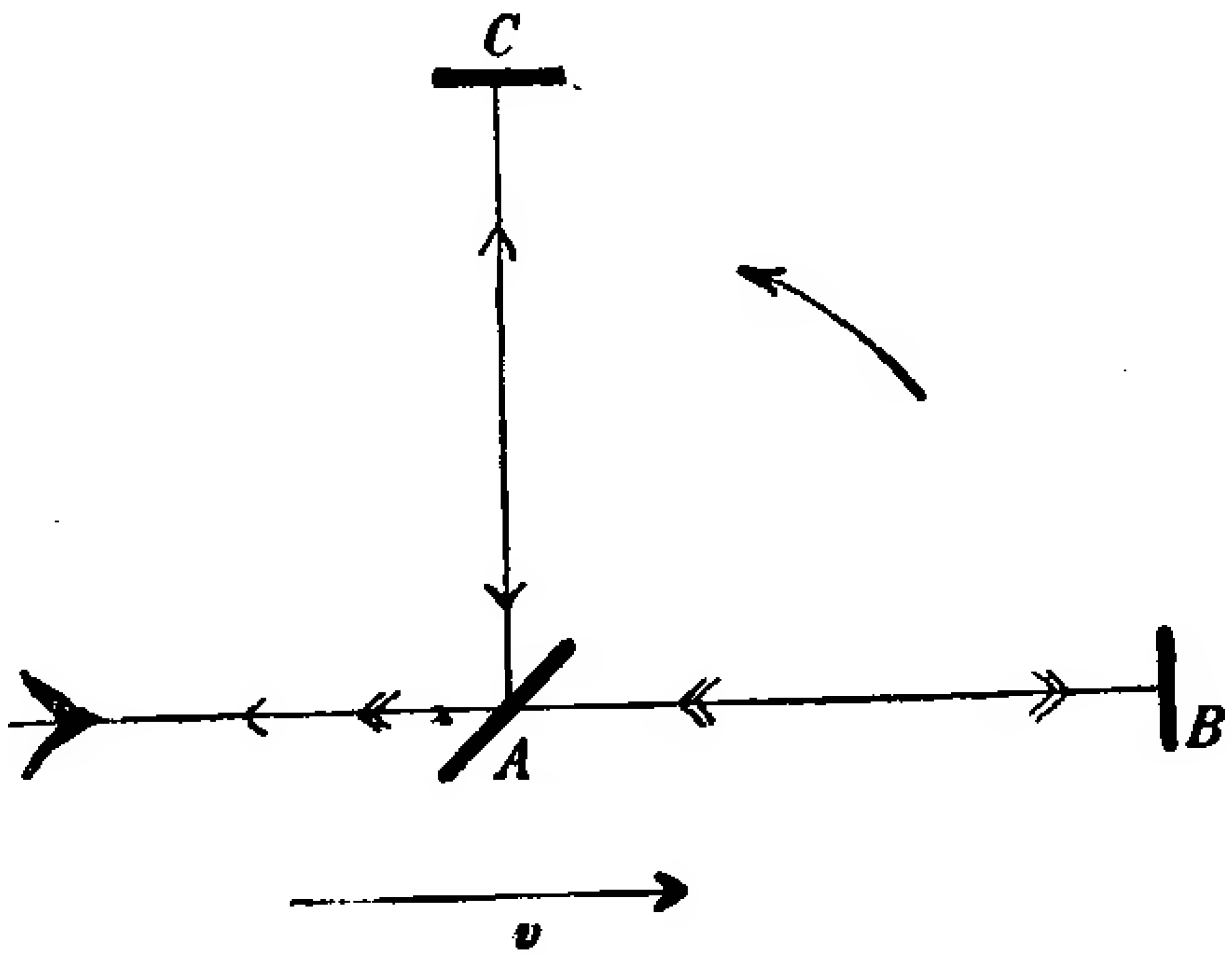
http://mathesis.ru

покой". Если наблюдатель, не участвующій въ движеніи, ошибочно полагаетъ, что онъ обнаруживаетъ вліяніе движенія для другого наблюдателя, участвующаго въ движеніи, — вліяніе, котораго послѣдній самъ не замѣчаетъ, — то это объясняется тѣмъ, что эти два наблюдателя производятъ измѣренія посредствомъ неодинаковыхъ мѣръ, что они не одно и то же называютъ тождественными временами, одинаковыми промежутками времени и одинаковыми длинами. Развитіемъ этого электродинамическаго принципа относительности, такъ называемаго принципа Лоренца-Эйнштейна, мы и займемся сейчасъ.

Изъ безконечнаго множества явленій мы остановимся прежде всего на одномъ, къ которому относились наши послѣднія разсужденія, а именно на распространеніи свѣта въ пустомъ пространствѣ (фиг. 4). Согласно принципу оно должно совершаться равномѣрно по всѣмъ направленіямъ какъ для одного, такъ и для другого наблюдателя, и притомъ для обоихъ наблюдателей съ одной и той же скоростью. Теперь возникаетъ прежде всего вопросъ: какъ мы измѣримъ скорость? какъ мы измѣримъ продолжительность процесса, который совершается въ области, протяженной также пространственно, — напримѣръ, продолжительность полета пули. Мы должны для этого регистрировать моменты времени, относя-

http://mathesis.ru

щіеся къ событіямъ въ различныхъ мѣстахъ. Мы можемъ, напримѣръ, воспользоваться слуховыми сигналами; но въ этомъ случаѣ, чтобы достигнуть хотя бы умѣренной точности, мы должны принимать въ разсчетъ продолжительность передачи сигнала отъ мѣста происшествія до мѣста, гдѣ совершается регистрированіе. Идеальнымъ былъ бы такой сигналъ, который произ-



Фиг. 4.

водится мгновенно и распространяется съ безконечно большой скоростью. Но въ дѣйствительности такого не существуетъ. Самыми скорыми сигналами, какіе мы знаемъ, являются свѣтовые сигналы въ пустомъ пространствѣ или, практически, также въ воздухѣ. И дѣйствительно, у насъ нѣтъ никакого болѣе точнаго способа, чѣмъ

http://mathesis.ru

свѣтовые сигналы, для сообщенія временъ отъ одного мѣста къ другому. Въ физическихъ измѣреніяхъ мы обыкновенно имѣемъ право разсматривать распространеніе свѣта, какъ процессъ, не требующій времени, — вѣдь свѣтъ проходитъ въ секунду 300 000 *км.*! Но это, очевидно, недопустимо въ тѣхъ случаяхъ, когда наблюдаемое явленіе распространяется съ подобной же скоростью и, слѣдовательно, недопустимо прежде всего при изслѣдованіи самого процесса распространенія свѣта. Мы какъ будто попали здѣсь въ заколдованный кругъ: чтобы быть въ состояніи измѣрить скорость свѣта, мы должны знать продолжительность передачи свѣтового сигнала. Однако, наше положеніе не столь ужъ безнадежно. Скорость свѣта опредѣляется на землѣ *) слѣдующимъ образомъ: свѣтовой сигналъ посылается отъ пункта A въ пунктъ B, отражается въ пунктѣ B и идетъ обратно въ A; все соотвѣтственное время наблюдается въ пунктѣ A и дѣлится на удвоенное

*) Мы разсматриваемъ здѣсь лишь „земные" методы; астрономическіе методы мы поймемъ лишь послѣ того, какъ усвоимъ принципы, которые мы должны здѣсь развить. Это же самое замѣчаніе относится и къ слѣдующему способу, который на первый взглядъ кажется принципіально самымъ простымъ: изготовляется пара абсолютно одинаковыхъ часовъ, на которыхъ время отсчитывается съ идеальной точностью, и перевозятся на двѣ станціи наблюденія.

http://mathesis.ru

разстояніе AB. Такимъ образомъ, намъ приходится наблюдать времена только въ **одномъ** мѣстѣ. За то мы должны сдѣлать допущеніе, что свѣтъ распространяется съ одинаковой скоростью отъ пункта A къ пункту B и отъ пункта B къ пункту A. Въ дѣйствительности мы всегда и дѣлаемъ это допущеніе, хотя вообще не считаемъ его заслуживающимъ упоминанія: мы предполагаемъ, что свѣтъ распространяется съ одинаковой скоростью по всѣмъ направленіямъ. Сдѣлавъ такое допущеніе, мы сейчасъ же получаемъ чрезвычайно точный методъ, посредствомъ котораго можно отнести другъ къ другу времена въ различныхъ мѣстахъ. Напримѣръ, синхронизмъ страсбургскихъ и кельскихъ (Khel*) часовъ можетъ и долженъ быть осуществленъ слѣдующимъ образомъ. Мы предполагаемъ, что предварительно провѣрили одинаковость хода обоихъ часовъ. Страсбургъ во время 0 посылаетъ въ Кель свѣтовой сигналъ, который тамъ отражается зеркаломъ; допустимъ, что въ моментъ 2 сигналъ возвращается въ Страсбургъ. Часы въ Келѣ **вѣрны** въ томъ случаѣ, если они въ моментъ прибытія сигнала показывали время 1; въ противномъ случаѣ нужно сдѣлать поправку, равную

---

*) Kehl — стратегическій пунктъ въ 5 *км.* отъ Страсбурга.

http://mitefesh.ru

разности между показаніями этихъ часовъ. Если мы со всевозможными часами на землѣ поступимъ такимъ же образомъ, какъ съ кельскими, то обитателю земли распространеніе свѣта будетъ казаться равномѣрнымъ*). Теперь представимъ себѣ, однако, существо съ человѣческимъ интеллектомъ на солнцѣ, или, говоря общѣе, существо, которое не участвуетъ въ движеніи земли, но сохраняетъ неизмѣнное положеніе относительно солнца. Для этого „человѣка солнца" вполнѣ естественно разсматривать распространеніе свѣта, какъ равномѣрное для него, т. е. относительно солнца. Онъ найдетъ его равномѣрнымъ, если онъ изготовитъ по тому же принципу, что и земной человѣкъ, но, сообразно своимъ собственнымъ наблюденіямъ, систему „синхронически идущихъ" часовъ. Но если онъ станетъ вблизи однихъ изъ своихъ часовъ и будетъ разсматривать одни за другимъ пробѣгающіе мимо него земные часы, то онъ найдетъ, что они показываютъ различную разность сравнительно съ его часами, и что они, слѣдовательно, не синхроничны. То же самое человѣкъ земли обнаружитъ на часахъ солнечнаго человѣка. Точнѣе: предположимъ, что земля движется въ направленіи $A'B'$ (фиг. 2); свѣтовой лучъ

*) По конструкціи — для центра Страсбурга, а въ дѣйствительности для любого центра.

http://mathesis.ru

выходитъ изъ точки A земли, когда эта точка совпадаетъ съ A'; онъ достигаетъ точки B земли, когда B совпадаетъ съ B'; здѣсь онъ отражается обратно къ точкѣ A и достигаетъ этой исходной точки, когда она совпадаетъ съ A''. Въ такомъ случаѣ путь до зеркала равенъ половинѣ всего пути для человѣка земли, но превышаетъ эту половину для солнечнаго человѣка. Положимъ, что „солнечные“ часы въ A' и земные въ A совпадаютъ; тогда солнечные часы въ B' должны спѣшить сравнительно съ земными часами въ B, когда оба эти прибора передвигаются одинъ мимо другого. Но если мы пустимъ свѣтовой лучъ перпендикулярно къ направленію движенія въ точку C (фиг. 3) и также отразимъ его, то онъ опишетъ относительно земли путь ACA, а относительно солнца — путь $AC'A''$. Первый путь имѣетъ середину въ точкѣ C, а середина второго пути находится въ C'. Слѣдовательно, если часы въ A и въ A' совпадаютъ, то совпадутъ и часы въ C и C'.

Отсюда вытекаетъ дальнѣйшее различіе. Предположимъ, что мы движемся съ метромъ, который мы держимъ въ направленіи движенія. При помощи этого метра мы желаемъ отложить, скажемъ, одинъ метръ на стержнѣ, который находится въ покоѣ относительно солнца. Съ этой цѣлью мы должны съ обоихъ концовъ нашего метра

http://mathesis.ru

одновременно нанести по мѣткѣ. Если мы на переднемъ концѣ, напримѣръ, сдѣлаемъ мѣтку слишкомъ поздно, то мы отложимъ длину, превышающую одинъ метръ. Эту погрѣшность мы и совершаемъ, дѣйствительно, по сужденію человѣка солнца, когда мы по нашему сужденію объ одинаковыхъ временахъ поступаемъ правильно. Это разногласіе не имѣетъ мѣста, если мы держимъ нашъ метръ перпендикулярно къ направленію движенія. Возьмемъ одновременно два скрещенныхъ метра; фигуру въ солнечной системѣ, которую мы считаемъ конгруэнтной съ этимъ равноплечимъ крестомъ, солнечный человѣкъ не признаетъ равноплечей: плечо въ направленіи движенія длиннѣе. Или обратно, тѣло, которое связано съ солнцемъ и которое по солнечному измѣренію представляется шаромъ, для земного наблюдателя окажется эллипсомъ, сплющеннымъ въ направленіи движенія земли.

Но это еще не все. Разсмотримъ снова фиг. 3. Одинъ и тотъ же процессъ представляется человѣку земли распространеніемъ свѣта по пути ACA, а человѣку солнца — распространеніемъ свѣта по пути $AC'A''$, который на фигурѣ является болѣе длиннымъ, чѣмъ первый путь. Но, согласно нашему требованію, человѣкъ земли и человѣкъ солнца испытываютъ одно и то же.

http://mathesis.ru

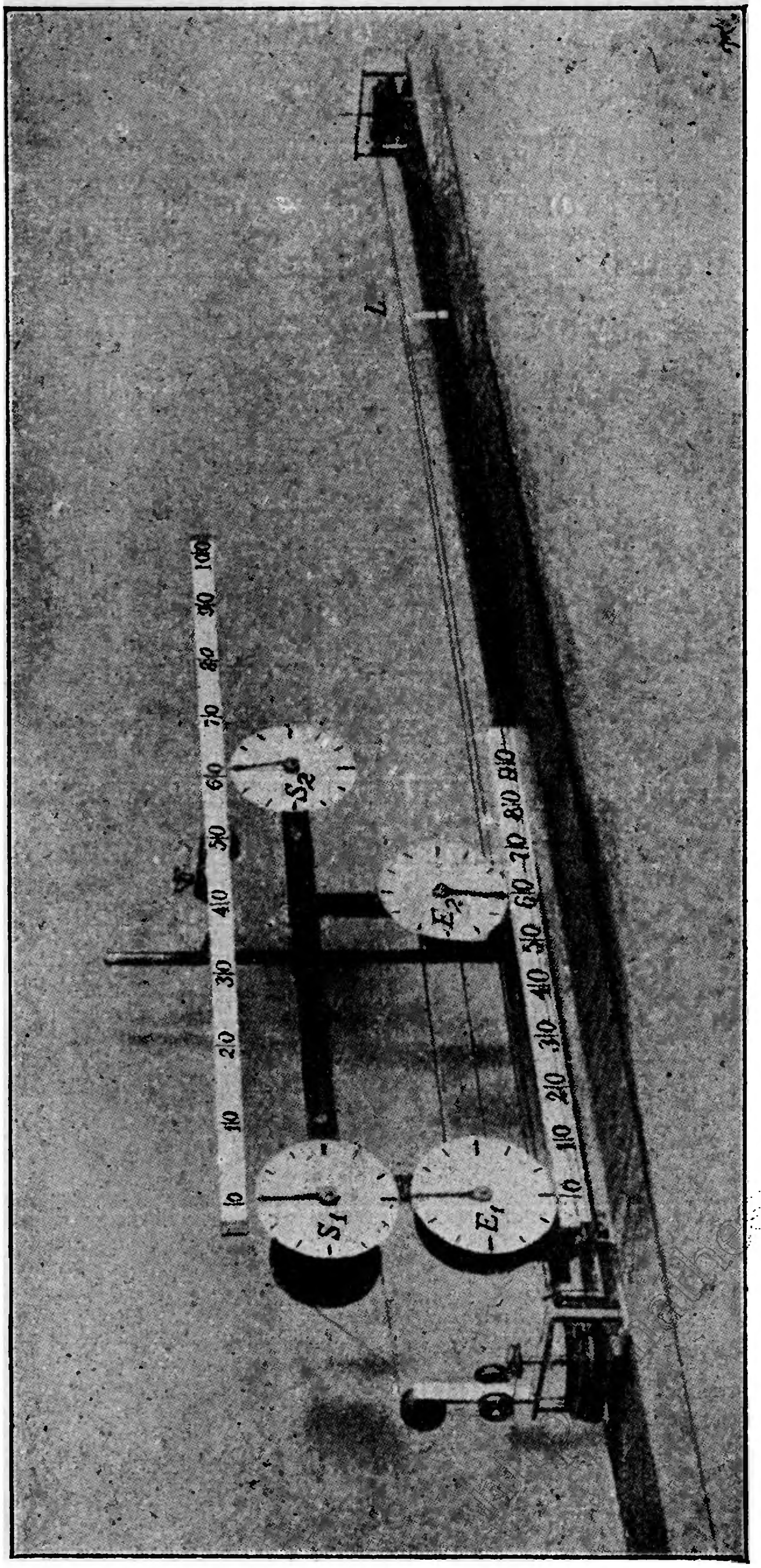
Оба они должны, слѣдовательно, получить одно и тоже значенiе для скорости свѣта. Поэтому они оба должны обладать неодинаковой мѣрой времени, ихъ часы должны имѣть неодинаковый ходъ.

До сихъ поръ мы показали, и при томъ исключительно качественнымъ образомъ, къ какому роду заключенiй насъ вынуждаетъ принципъ относительности. Мы не показали, что всѣ требованiя, которыя вытекаютъ изъ этого принципа относительно распространенiя свѣта, могутъ быть также удовлетворены точнымъ образомъ. Но такъ оно *есть* въ дѣйствительности, и этимъ требованiямъ возможно удовлетворить лишь *однимъ* способомъ. Прежде всего еще разъ обратимся къ постулату: „для каждой изъ двухъ системъ распространенiе свѣта въ пустомъ пространствѣ есть *одинаковый* процессъ; онъ совершается съ одинаковой скоростью и каждый разъ равномѣрно по всѣмъ направленiямъ. Ни одна изъ этихъ двухъ системъ не выдѣляется по сравненiю съ другой“. Этотъ постулатъ допускаетъ очень простую математическую формулировку. Рѣшенiе вопроса выражается группой простыхъ соотношенiй между координатами и временемъ въ обѣихъ системахъ (см. приложенiе въ концѣ статьи). Эти уравненiя выражаютъ то же самое, что модель, изображенная на нижеслѣдующей фигурѣ.

http://mathesis.ru

Безконечный шнуръ перекинутъ черезъ два блока; мы будемъ приводить его въ движеніе, при чемъ онъ, увлекая съ собой насаженную марку (L), будетъ представлять намъ распространеніе свѣтового сигнала въ одномъ или въ другомъ направленіи. Комната и двое часовъ S_1 и S_2, неподвижно установленные въ ней, принадлежатъ „находящейся въ покоѣ" системѣ солнца. Каретка со своими двумя часами E_1 и E_2, перемѣщающаяся по рельсамъ, представитъ намъ „движущуюся" систему земли. Всѣ движенія — свѣтового сигнала, каретки и стрѣлокъ на часахъ обоихъ родовъ — обусловливаются вращеніемъ одной и той же оси; ихъ скорости находятся въ строго опредѣленныхъ отношеніяхъ. Лишь эти отношенія имѣютъ для насъ значеніе: то обстоятельство, что огромную скорость свѣта мы замѣнили ничтожной скоростью, равной нѣсколькимъ сантиметрамъ въ секунду, несущественно; существенно, однако, то, что здѣсь мы сдѣлали скорость земли равной $^3/_4$ скорости свѣта, тогда какъ въ дѣйствительности отношеніе составляетъ лишь $^1/_{10000}$. Исключительно для болѣе удобнаго объясненія мы назовемъ „12 часами" время оборота часовъ и, соотвѣтственно этому, будемъ говорить объ 1 часѣ, 2 часахъ и т. д. Что касается длинъ, то мы будемъ придерживаться обычной терминологіи. Мы обнаружимъ тогда, что какая-

http://nplus1.ru/


L
S1
S2
E1
E2

нибудь марка на нашей кареткѣ пробѣгаетъ разстоянiе между двумя небесными часами, равное 60 *см.*, въ $10^1/_2$ часовъ. Такова по нашей модели и на нашемъ языкѣ скорость земли относительно солнца. По отношенiю къ этой модели мы находимся въ мiрѣ „солнечнаго человѣка“. Мы можемъ поэтому обойтись безъ однихъ изъ двоихъ часовъ солнечной системы, такъ какъ мы непосредственно при помощи д ѣ й с т в и т е л ь н ы х ъ свѣтовыхъ сигналовъ распознаемъ, что́ представляютъ собою въ н а ш е м ъ мiрѣ тождественныя времена въ различныхъ мѣстахъ. Но чтобы получить то же самое, что испытываетъ человѣкъ солнца, и т о л ь к о это, мы должны отвлечься отъ этой способности: вѣдь для него не существуетъ бо́льшей скорости сигнала, чѣмъ скорость марки и шнура. Что двое часовъ солнечной системы синхроничны, доказывается для насъ, слѣдовательно, не тѣмъ, что мы одновременно взглянемъ на стрѣлки обоихъ часовъ, а только тѣмъ, что свѣтовая марка пробѣгаетъ отъ первыхъ часовъ ко вторымъ и, обратно, отъ вторыхъ часовъ къ первымъ за одинаковое время. Это и имѣетъ мѣсто въ дѣйствительности: свѣтовая марка оставляетъ первые часы, когда они показываютъ 7 ч. 40 м., и если мы сейчасъ же заставимъ ее вернуться, то она достигнетъ первыхъ часовъ, когда они будутъ показывать 3 ч.

http://mathesis.ru

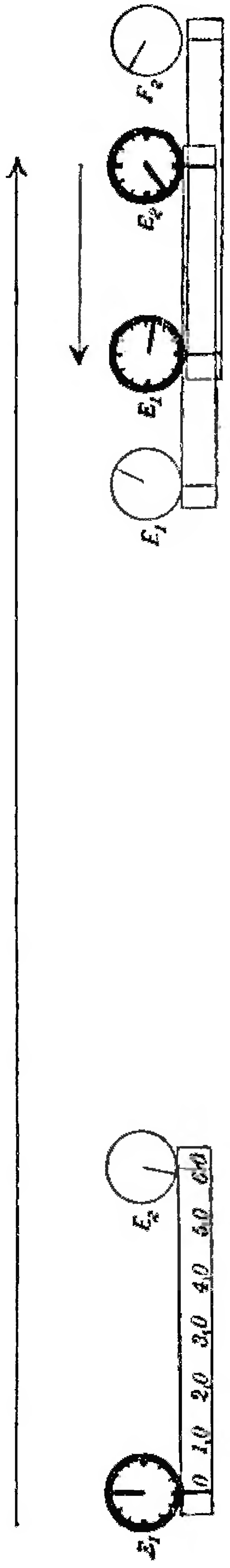
20 м. Она, слѣдовательно, пробѣжала путь въ 60 *см.* оба раза за одно и тоже время равное $7^2/_3$ часамъ *).

Съ перваго взгляда насъ поражаетъ, что двое часовъ земной системы не показываютъ одинаковаго времени: вторые часы, переднiе въ направленiи движенiя, отстаютъ отъ первыхъ на $5^3/_4$ часовъ. Это обнаруживается при непосредственномъ взглядѣ; это оказалось бы такъ и въ дѣйствительности, если бы мы закрѣпили земную систему, привели бы въ движенiе свѣтовую марку и затѣмъ опредѣлили бы время пути, прямого и обратнаго, такъ, какъ мы это дѣлали выше. Но синхронизмъ обоихъ часовъ понимается не такъ. Они должны быть синхроничны для земного наблюдателя, который движется относительно солнечной системы съ совершенно опредѣленной скоростью, равной $^3/_4$ скорости свѣта. Для него они дѣйствительно синхроничны. Доказательство состоитъ въ слѣдующемъ (фиг. 5 **). Свѣтовая марка оставляетъ первые часы, когда они показываютъ 12 ч.; она достигаетъ вторыхъ часовъ

*) Числа слегка округлены.

**) На фигурахъ отъ 5 до 9 начерчены жирными линiями лишь тѣ части модели, которыя являются существенными для соотвѣтственнаго опыта; чтобы читателю было легче орiентироваться, остальныя части намѣчены рядомъ тонкихъ линiй.

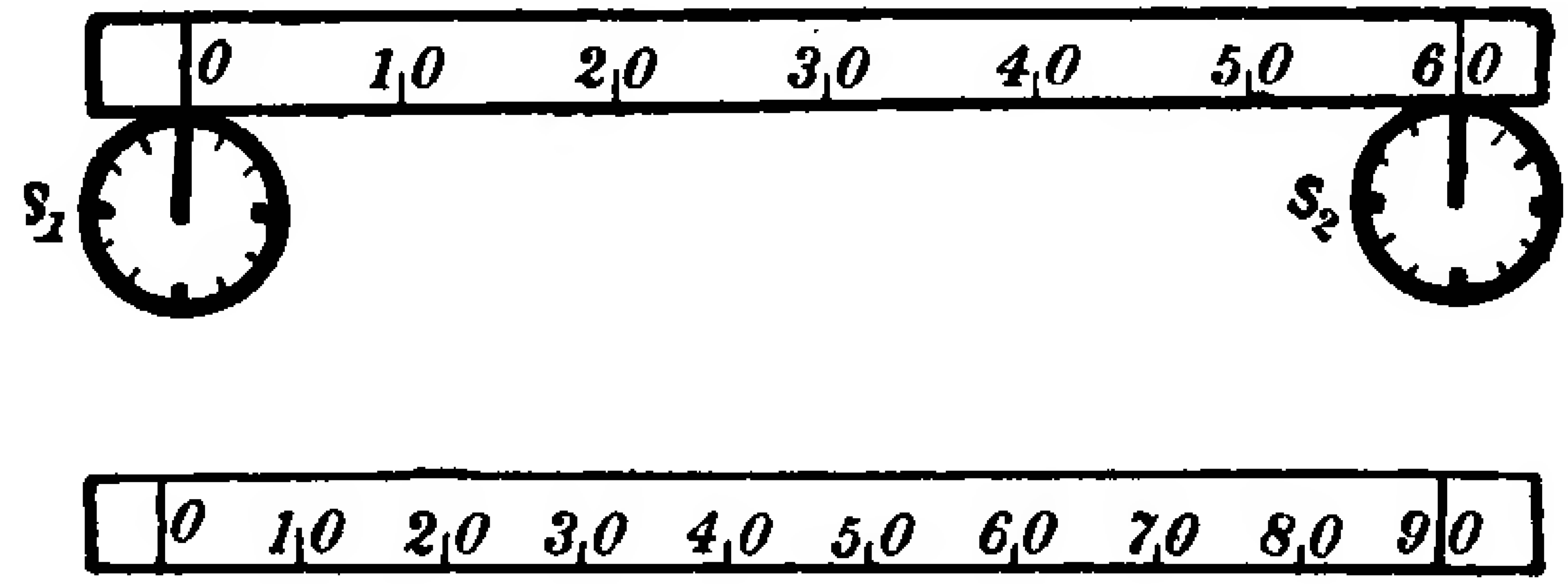
http://mathesis.ru



Фиг. 5.

http://mathesis.ru

въ моментъ, когда послѣдніе показываютъ 7 ч. 40 м., и она на обратномъ пути встрѣчаетъ первые часы, когда они показываютъ 3 ч. 20 м. Такимъ образомъ, прямой и обратный пути опять длятся одинаковое время, равное по прежнему $7^2/_3$ часамъ. Далѣе, по масштабу земной системы разстояніе между обоими часами опять равно 60 *см.* (фиг. 6), и, такимъ образомъ, скорость свѣта въ земной



Фиг. 6.

системѣ снова такова же, какъ и въ солнечной: 60 *см.* въ $7^2/_3$ часовъ.

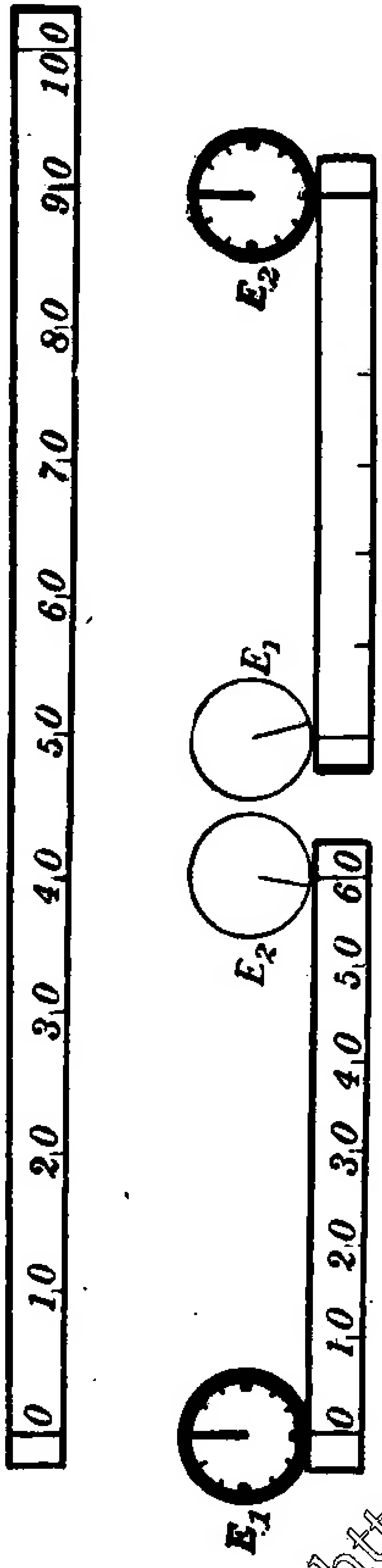
Но вѣренъ ли земной масштабъ? Непосредственно на глазъ мы отвѣтимъ: нѣтъ, онъ укороченъ; то что онъ выдаетъ намъ за „60 *см.*“ покрываетъ лишь 40 *см.* рядомъ лежащаго солнечнаго масштаба. Это сужденіе подтвердится, если мы, отказавшись отъ нашихъ „сверхчеловѣческихъ“ способностей, будемъ пользоваться измѣрительными методами, которыми распола-

http://mathesis.ru

гаетъ лишь человѣкъ солнца: онъ долженъ изъ двухъ мѣстъ нанести марки на проходящемъ мимо него земномъ масштабѣ, и при томъ одновременно, т. е. въ моменты, когда двое находящихся тамъ „солнечныхъ" часовъ показываютъ одно и то же время (фиг. 6). Отрѣзокъ, который онъ такимъ образомъ отложитъ между мѣстами обоихъ неподвижныхъ часовъ, по земному масштабу равенъ „90 *см.*", тогда какъ по солнечному масштабу разстояніе между обоими солнечными часами составляетъ лишь 60 *см.* Итакъ, попрежнему земной масштабъ укороченъ сравнительно съ небеснымъ въ отношеніи 2 къ 3.

Такимъ образомъ, мы какъ будто сдѣлали удивительную конструкціонную ошибку, чтобы получить затѣмъ результатъ, который уже не будетъ удивительнымъ. Въ дѣйствительности дѣло обстоитъ не такъ. Мы съ совершенно одинаковымъ основаніемъ можемъ утверждать, что небесный масштабъ укороченъ сравнительно съ земнымъ въ отношеніи 2 къ 3. Мы получимъ этотъ результатъ, если это измѣреніе будетъ выполнено земнымъ наблюдателемъ (фиг. 7). Этотъ наблюдатель долженъ изъ двухъ различныхъ мѣстъ, въ которыхъ онъ имѣетъ на нашей модели свою пару часовъ, нанести марки на проходящемъ мимо него небесномъ масштабѣ въ моменты, когда эта пара часовъ показываетъ

http://mathesis.ru



Фиг. 7.

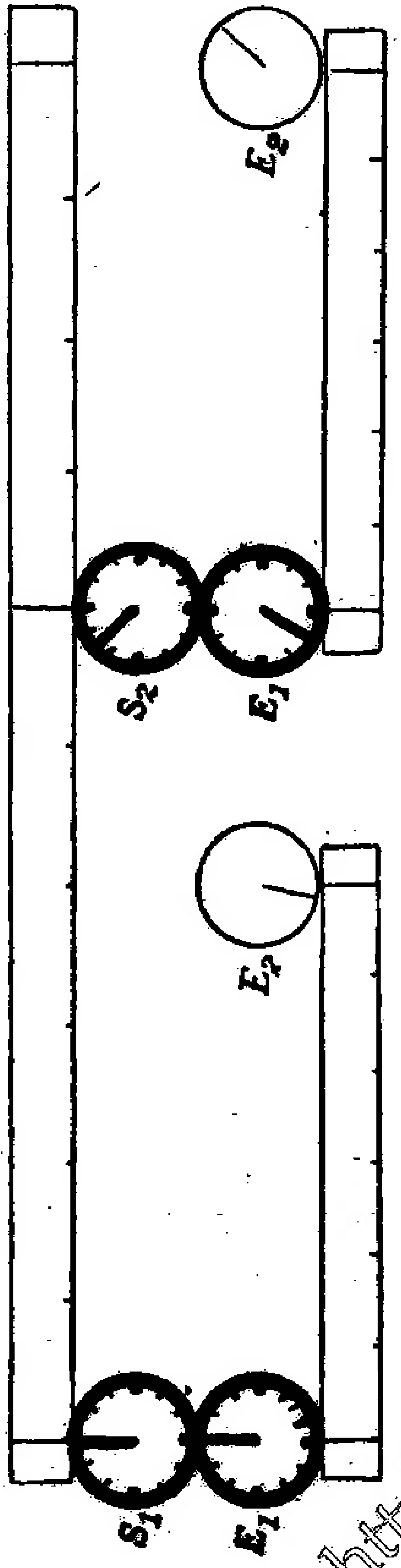
http://mathesis.ru

одно и то же время, — скажемъ, 12 ч.. Первые часы проходятъ въ этотъ моментъ какъ разъ нулевую точку небеснаго масштаба; они достигнутъ дѣленія „90 *см.*“, когда вторые часы будутъ также показывать 12 ч. Но по земному масштабу разстояніе между первыми земными часами и вторыми равно лишь 60 *см.* Такъ это разстояніе оцѣнилъ, слѣдовательно, обитатель земли, тогда какъ, согласно небесному масштабу, оно составляетъ 90 *см.*

Итакъ, земные масштабы для солнечнаго человѣка и небесные масштабы для обитателя земли кажутся укороченными въ направленіи движенія въ отношеніи 2 къ 3, считая каждый разъ относительно тѣхъ значеній, которыя соотвѣтствуютъ масштабамъ въ ихъ собственномъ мірѣ.

Но спрашивается далѣе, имѣютъ ли наши часы вѣрный ходъ? Легко видѣть, что земные часы идутъ медленнѣе небесныхъ. Это же скажетъ и человѣкъ солнца, который живетъ въ одномъ мірѣ съ нами, но не обладаетъ нашимъ быстрымъ взглядомъ. Онъ наблюдаетъ показаніе земныхъ часовъ въ два различныхъ момента, т. е. онъ сравниваетъ его съ показаніемъ двухъ своихъ часовъ, когда они проходятъ мимо первыхъ. Онъ найдетъ такимъ образомъ (фиг. 8): стрѣлка земныхъ часовъ за время, когда эти

http://mathesis.ru



Фиг. 8.

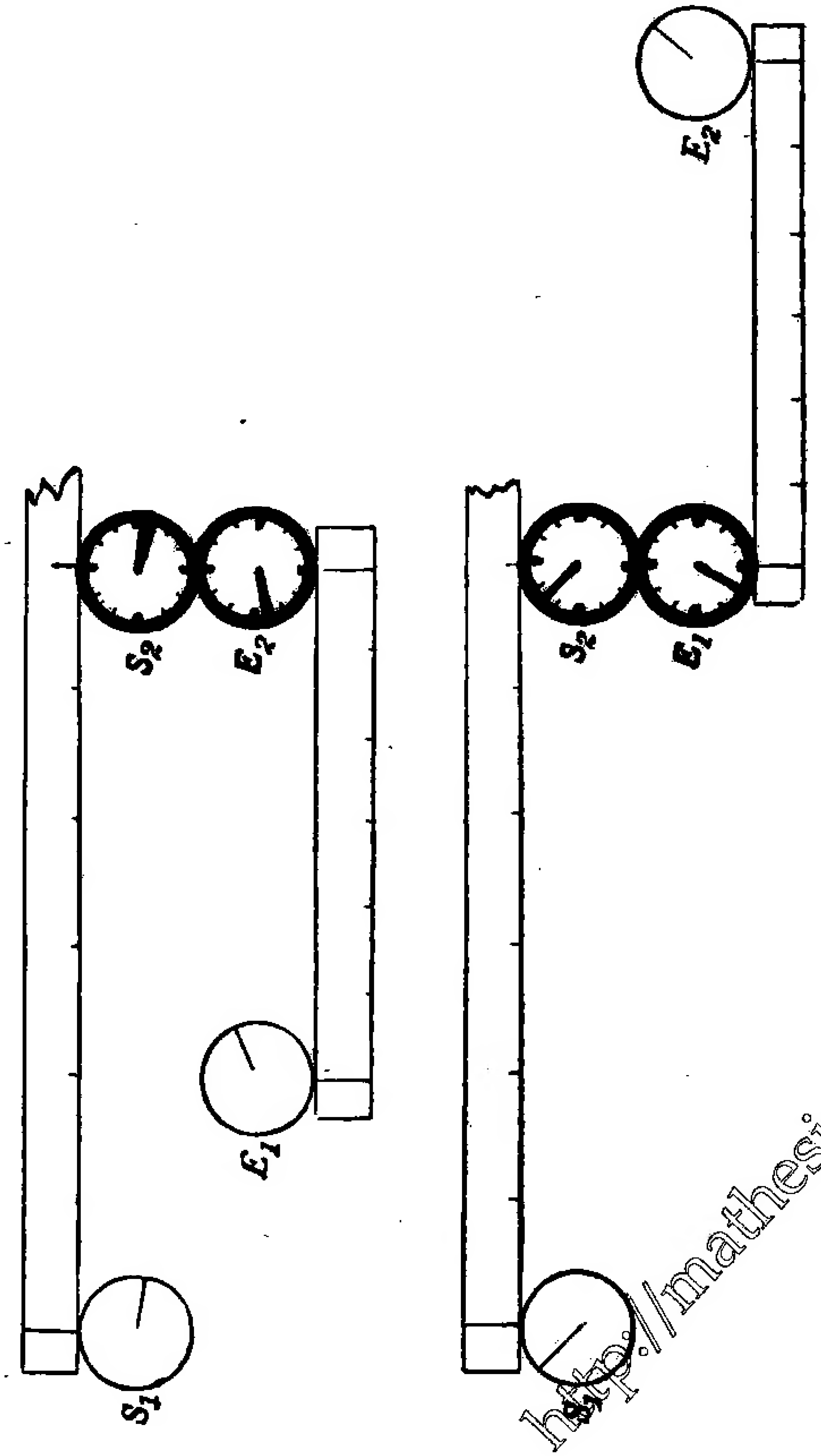
http://mathesis.ru

часы проходятъ отъ первыхъ небесныхъ часовъ до вторыхъ, т. е. разстояніе 60 *см.*, подвинулась на 7 часовъ; но показанія обоихъ небесныхъ часовъ въ моменты прохожденій различаются на $10^1/_2$ часовъ. Онъ дѣлаетъ изъ этого такое заключеніе: событіе, которое совершается въ опредѣленномъ пунктѣ земного міра и продолжительность котораго тамъ считается равной 7 часамъ, „въ дѣйствительности" продолжалось $10^1/_2$ часовъ.

Опять таки, какъ по оцѣнкѣ солнечнаго человѣка земные часы идутъ слишкомъ медленно, такъ солнечные часы по оцѣнкѣ земного человѣка отстаютъ въ такомъ же отношеніи 2:3. Дѣйствительно, послѣдній наблюдаетъ слѣдующее (фиг. 9): небесные часы (вторые на модели) проходятъ мимо обоихъ земныхъ часовъ, которые для него синхроничны; во время этого движенія небесные часы продвинутся впередъ на $^2/_3$ того количества, которое имѣло мѣсто въ предыдущемъ опытѣ, т. е. продвинутся на 7 часовъ; но двое земныхъ часовъ въ моменты прохожденій различаются на $10^1/_2$ часовъ.

Итакъ, для солнечнаго человѣка земные процессы и для человѣка земли небесные процессы кажутся замедленными въ своемъ теченіи въ отношеніи 2 къ 3.

http://mathesis.ru



Фиг. 9.

http://mathesis.ru

Подведемъ итогъ. Наша модель показала намъ слѣдующее: въ двухъ равномѣрно движущихся другъ относительно друга системахъ S и S' мы можемъ расположить часы и масштабы такимъ образомъ, чтобы опредѣленная скорость, измѣренная посредствомъ нихъ, обнаруживала одинаковое значеніе для наблюдателя B въ системѣ S и для наблюдателя B' въ системѣ S'— безразлично, будетъ ли эта скорость имѣть такое же направленіе, какъ движеніе системы S' или же она будетъ противоположна ей; кромѣ того, наблюдатель B дѣлаетъ на измѣрительныхъ приборахъ въ системѣ S' такія же наблюденія, какъ наблюдатель B' на инструментахъ въ системѣ S. Далѣе, пусть всѣ часы въ S', лежащіе въ плоскости, перпендикулярной къ направленію движенія, получатъ одинаковую разность показанія относительно соотвѣтственныхъ часовъ въ S, и пусть всѣ масштабы въ такой плоскости въ системѣ S' будутъ отмѣчены тѣми же цифрами, какъ и масштабы въ системѣ S, съ которыми они совмѣщаются. Тогда сказанное выше имѣетъ силу въ самомъ общемъ случаѣ: для любого направленія движенія и для расположенныхъ любымъ образомъ часовъ и масштабовъ. Слѣдовательно, при надлежащемъ расположеніи часовъ и масштабовъ процессъ, который съ системы S кажется равномѣрнымъ распростране-

http://mathesis.ru

ніемъ какого-либо состоянія по всѣмъ направленіямъ съ опредѣленной скоростью c, покажется точно такимъ же изъ системы S'; при этомъ ни одна изъ этихъ системъ не выдѣляется сравнительно съ другой въ отношеніи измѣренія пространства и времени.

Принципъ относительности утверждаетъ: если системы S и S' принадлежатъ къ группѣ неподвижныхъ звѣздъ и если въ качествѣ скорости c выбрана скорость свѣта въ вакуумѣ, то *всѣ* электрическіе процессы, и въ частности также всѣ оптическіе, протекаютъ такъ, что между обѣими системами не замѣчается никакого различія.

Провѣрка этого утвержденія совершается слѣдующимъ путемъ. Всѣ наши опыты основаны на наблюденіяхъ, которыя производятся съ одной *опредѣленной* системы въ группѣ неподвижныхъ звѣздъ — съ земли. Этой системѣ принадлежатъ *наши* масштабы, *наши* часы. При помощи этихъ масштабовъ мы прежде всего устанавливаемъ количественную сторону электрооптическихъ явленій на земной поверхности. Теперь нашъ принципъ утверждаетъ: точно такіе же законы найдетъ для явленій въ другой системѣ *ея* обитатель, если онъ производитъ измѣренія посредствомъ *своихъ* масштабовъ и часовъ; принципъ въ то же время указываетъ намъ, какъ мы должны произвести переоцѣнку,

чтобы узнать, каковы будутъ эти явленія для насъ.

Напримѣръ, мы знаемъ *), что отъ источника свѣта, находящагося въ вакуумѣ въ покоѣ (относительно насъ), свѣтъ распространяется равномѣрно по всѣмъ направленіямъ со скоростью $c = 300\,000$ *км./сек.* Совершенно такимъ же образомъ должно происходить распространеніе свѣта отъ неподвижной звѣзды для ея обитателя. Тогда переоцѣнка, согласно предыдущему, приводитъ къ выводу: для насъ оно также происходитъ равномѣрно со скоростью c. Но переоцѣнка даетъ далѣе: направленіе излученія, доходящаго до насъ, не совпадаетъ съ прямой звѣзда-земля. Поэтому неподвижная звѣзда видна для насъ не на ея дѣйствительномъ мѣстѣ, но кажется сдвинутой въ сторону: по своей величинѣ и направленію это смѣщеніе есть то именно, которое дѣйствительно обнаруживаетъ намъ такъ называемая аберрація **).

Другой примѣръ: мы знаемъ, что въ спокойной водѣ (т. е. находящейся въ покоѣ относительно насъ) свѣтъ распространяется равномѣрно по всѣмъ направленіямъ со скоростью q, которая равна отношенію скорости свѣта c въ вакуумѣ

*) См. ниже стр 42.

**) Вычисленіе см. въ Приложеніи.

http://mathesis.ru

къ показателю преломленія *n* воды. Какъ распространяется свѣтъ въ водяномъ столбѣ, который имѣетъ относительно насъ скорость *w*? Для того, кто уносится съ водой, распространеніе происходитъ совершенно такимъ же образомъ, какъ въ вакуумѣ. Предположимъ теперь, что распространеніе свѣта происходитъ какъ разъ въ направленіи теченія. Тогда мы могли бы совершить переоцѣнку для нашего воспріятія посредствомъ нашей модели: для этого мы должны были бы сообщить свѣтовой маркѣ скорость *q* (вмѣсто прежней *c*) относительно движущейся системы и затѣмъ посмотрѣли бы, какая скорость соотвѣтствуетъ ей въ покоющейся системѣ. Тогда оказалось бы, что эта скорость отлична отъ *q*, но не равна также суммѣ скорости *q* со скоростью теченія *w*: она имѣетъ нѣкоторое среднее значеніе, а именно то, которое Физо нашелъ экспериментальнымъ путемъ *).

Эти примѣры иллюстрируютъ общее положеніе дѣлъ: нѣтъ ни одного электро-оптическаго процесса, который противорѣчилъ бы принципу относительности. Другой вопросъ, насколько этотъ принципъ доказанъ опытомъ. На это слѣдуетъ замѣтить: переоцѣнка содержитъ двѣ фазы — во-первыхъ, измѣненіе начальнаго момента въ шка-

*) Вычисленіе см. въ Приложеніи.

http://mathesis.ru

лахъ времени и, во-вторыхъ, измѣненіе масштабовъ длины и времени. Но эти двѣ фазы въ весьма неодинаковой мѣрѣ вліяютъ на результатъ. Зависимость здѣсь такова: отношеніе скорости тѣла w къ скорости свѣта c всегда выражается малой дробью — около 1/10 000 въ случаѣ аберраціи и менѣе 1/30 000 000 въ случаѣ текущей воды. Съ этой дробью сравнимы, т. е. „такого же порядка величины" суть соотвѣтственныя отклоненія, вызываемыя смѣщеніемъ въ отсчетѣ времени; они еще могутъ быть измѣрены при помощи наиболѣе тонкихъ оптическихъ методовъ. Измѣненія же масштабовъ влекутъ за собой отклоненія порядка $(w/c)^2$, т. е. соотвѣтственно 1/100 000 000 и 1/900 000 000 000 000, а такія величины совершенно недоступны для нашихъ средствъ наблюденія.

То же самое относится ко всѣмъ нашимъ наблюденіямъ надъ тѣлами, которыя имѣютъ движеніе относительно земли: при движеніяхъ, которыя мы можемъ вызвать по нашему желанію, скорость всегда остается слишкомъ малой; при движеніяхъ же небесныхъ тѣлъ возможность успѣха исключается благодаря тому обстоятельству, что здѣсь мы можемъ лишь наблюдать, а не экспериментировать. Поэтому всѣ эти наблюденія могли бы ужиться съ электродинамикой,

http://mathesis.ru

которая принимала бы принципъ относительности не въ полномъ объемѣ.

Опыты, которые повели къ установленію принципа, относятся къ распространенію свѣта относительно земли. Скорость земли относительно солнца составляетъ, какъ мы уже упомянули, 1/10 000 скорости свѣта; Майкельсону и Морлею удалось доказать*), что это движеніе не вызываетъ измѣненій распространенія свѣта, даже величиной въ 1/100 000 000 его значенія, или хотя бы измѣненіе, равное малой долѣ этой дроби. Итакъ, несмотря на движеніе земли, распространеніе свѣта относительно земли отличается совершенно точной равномѣрностью для обитателя земли. Физическое значеніе этого положенія мы сейчасъ разсмотримъ подробнѣе.

http://mathesis.ru

*) См. О. Лоджъ, „Міровой эѳиръ" Одесса, „Mathesis", 1911.

3. Принципъ относительности Лоренца-Эйнштейна, какъ общій принципъ физики.

До сихъ поръ мы говорили исключительно объ электро-оптическихъ наблюденіяхъ. Чтобы производить эти наблюденія, мы должны имѣть масштабы и часы. Мы предположили, что эти измѣрительные инструменты вѣрны и остаются вѣрными въ любомъ положеніи, во всякомъ мѣстѣ и во всякое время. Мы предполагаемъ въ частности: во-первыхъ, когда мы вращаемъ масштабъ, онъ долженъ сохранить свою длину; когда мы вращаемъ шаръ, онъ долженъ оставаться шаромъ; когда масштабъ или шаръ въ теченіе дня получаютъ безъ нашего вмѣшательства различную оріентировку относительно солнца, то они при этомъ тоже должны остаться безъ измѣненія. Во-вторыхъ, часы, которые въ опредѣленный моментъ находятся на переднемъ краю

http://mathesis.ru

земли, спустя двѣнадцать часовъ оказываются на заднемъ краю: по нашему предположенію, они должны, однако, по прежнему вѣрно показывать время. Въ-третьихъ, благодаря совмѣстному дѣйствію движенія земли вокругъ солнца и движенія солнечной системы относительно неподвижныхъ звѣздъ получаются перемѣнныя значенія для скорости земли относительно неподвижныхъ звѣздъ; но и эти измѣненія скорости не должны, по нашему предположенію, измѣнять длины нашихъ масштабовъ, а также хода нашихъ часовъ. Все это кажется самоочевиднымъ. Но по нашему принципу это не только не очевидно, но даже ложно: болѣе того, согласно принципу, самое утвержденіе, что все это вѣрно, не имѣетъ никакого смысла. Вѣдь во всѣхъ этихъ предположеніяхъ мы считаемъ, что все это вѣрно для насъ, земныхъ наблюдателей; но въ такомъ случаѣ эти предположенія не вѣрны для наблюдателя на неподвижной звѣздѣ: для него тогда масштабъ постоянно мѣняетъ свою длину, а часы — свой ходъ.

Это, дѣйствительно, вѣрно *для насъ*. *Майкельсонъ* и *Морлей* доказали, что масштабъ — на опытѣ въ *формѣ* каменнаго консоля — не измѣняется для насъ при измѣненіи его оріентировки относительно движенія земли. Онъ сохраняетъ *для насъ* свою длину, т. е. *для насъ* свѣтъ пробѣгаетъ его длину всегда за одина-

http://mathesis.ru

ковое время. Но въ такомъ случаѣ это время должно измѣняться для солнечнаго человѣка; для него, слѣдовательно, должна также измѣняться длина масштаба. — Второе утвержденіе равносильно слѣдующему. Представимъ себѣ, что горизонтальная ось находится въ состояніи длительнаго равномѣрнаго вращенія; на своихъ концахъ она снабжена двумя дисками съ дѣленіями по краямъ; эти диски должны служить въ качествѣ часовъ; они синхроничны, если двѣ опредѣленныя одинаково-отмѣченныя марки на ихъ краяхъ одновременно проходятъ черезъ свое наиболѣе высокое положеніе. Утвержденіе гласитъ: эти два диска постоянно сохраняютъ синхроничность, если даже дискъ, который вначалѣ при движеніи земли шелъ впереди, спустя двѣнадцать часовъ движется позади второго: если бы это оказалось не такъ, то это означало бы, что ось въ теченіе этого промежутка закрутилась въ опредѣленномъ направленіи. Для этого допущенія у насъ нѣтъ никакого основанія; но, конечно, когда мы утверждаемъ, что для насъ ось не закрутилась, то изъ этого слѣдуетъ, что для наблюдателя на солнцѣ ось закрутилась: дѣйствительно, относительно него шли впереди сперва о д н и часы, потомъ в т о р ы е. Н а б л ю д е н і е такого рода никогда не было сдѣлано, — но никогда также не было установлено н е п о с р е д-

http://mathesis.ru

ственно, что *ходъ* нашихъ часовъ не зависитъ отъ движенія земли. Оба опыта, конечно, неосуществимы; но мы можемъ косвенно заключить, что результаты оказались бы вполнѣ согласными съ этими утвержденіями: вѣдь мы видѣли, что всѣ эти утвержденія самымъ тѣснымъ образомъ связаны другъ съ другомъ.

Во всемъ изложенномъ только опытъ *Майкельсона-Морлея* есть фактъ, а все остальное представляетъ собою заключенія изъ принципа относительности. И теперь спрашивается еще разъ: вѣренъ ли принципъ? Положимъ, что человѣкъ солнца (или „человѣкъ“ какой-либо неподвижной звѣзды), производя измѣренія, всякій разъ при помощи *своего* мимоидущаго масштаба, нашелъ бы, что и *для него* земной масштабъ сохраняетъ свою длину, если повернуть его на 90°. Это значило бы: то самое распространеніе свѣта въ пустомъ пространствѣ, которое для земного человѣка является равномѣрнымъ, не равномѣрно для солнечнаго человѣка; — или: его собственные масштабы измѣняютъ при вращеніи свою длину, поскольку онъ судитъ о нихъ сообразно съ этимъ оптическимъ процессомъ. Итакъ, одно изъ двухъ: либо распространеніе свѣта на солнцѣ не равномѣрно (въ томъ смыслѣ, что, судя по этому процессу, не существуетъ твердыхъ тѣлъ); либо же все зависитъ отъ того,

http://mathesis.ru

принадлежитъ ли источникъ свѣта землѣ или солнцу: общѣе говоря, распространеніе свѣта въ безвоздушномъ пространствѣ не есть нѣчто опредѣленное: чтобы быть въ состояніи опредѣлять дальнѣйшій ходъ этого процесса, необходимо знать его предыдущую исторію. Второе предположеніе находится въ противорѣчіи со всей нашей оптикой; а принять первое допущеніе равносильно тому, чтобы приписывать землѣ исключительное положеніе во вселенной. — Мы отбрасываемъ оба эти допущенія. Тогда мы приходимъ къ нашему принципу прежде всего для двухъ системъ солнца и земли*). Мы заключаемъ далѣе (опять-таки потому, что мы не имѣемъ права приписывать землѣ исключительнаго положенія): во всякой системѣ, которая равномѣрно движется относительно неподвижныхъ звѣздъ, движеніе не оказываетъ вліянія на масштабы и часы — для наблюдателя, принадлежащаго къ той же системѣ. Этимъ сейчасъ же опредѣляются измѣненія, которыя воспринимаетъ обитатель другой системы группы неподвижныхъ звѣздъ, — въ частности, земли. Наблюденію

*) При этомъ предполагается далѣе, что опытъ Майкельсона далъ бы тотъ же отрицательный результатъ не только въ сколь угодно разрѣженномъ воздухѣ, но и въ совершенномъ вакуумѣ.

http://mathesis.ru

эти измѣненія не поддаются. Это не должно насъ удивлять: предположимъ, что мы можемъ сообщить тѣлу скорость относительно насъ, которую имѣетъ земля относительно солнца; тогда отрѣзокъ, лежащій въ направленіи движенія, сократился бы для насъ на 1/200 000 000 своей длины, и въ такой же пропорціи измѣнился бы ходъ лежащихъ на немъ часовъ. Предположимъ далѣе, что это тѣло обладаетъ размѣрами земли; въ такомъ случаѣ наибольшая разница между двумя прежде синхроничными часами составляла бы для насъ 4 милліонныя доли секунды. Но въ принципѣ всѣ эти измѣненія доступны экспериментальной повѣркѣ, а именно — при помощи точно такихъ же методовъ, посредствомъ которыхъ въ нашей модели человѣкъ земли измѣрялъ міръ человѣка солнца.

Мы примемъ теперь, что принципъ Лоренца-Эйнштейна вѣренъ. Въ немъ содержится слѣдующее положеніе: если въ пустомъ пространствѣ дана свѣтовая волна, то ея распространеніе съ количественной стороны всегда представляется одинаковымъ процессомъ, гдѣ бы ни былъ ея источникъ и изъ какой бы системы группы неподвижныхъ звѣздъ она ни наблюдалась. Для нея не существуетъ системы сравненія, относительно которой она допускала бы однозначную оріентировку. Для среды „эѳиръ“, въ которой

http://mathesis.ru

происходилъ бы этотъ процессъ, нѣтъ мѣста въ теоріи относительности. Въ противоположность старой физикѣ, для этой теоріи пустое пространство есть, дѣйствительно, ничто.

Это есть основное положеніе чистой электродинамики. Но изъ предыдущаго ясно, что область примѣненія принципа Лоренца-Эйнштейна, вызваннаго къ жизни требованіями электродинамики, не можетъ, однако, ограничиваться одной электродинамикой: онъ содержитъ уже въ себѣ предложенія механической природы. Совмѣстимы ли они съ извѣстными намъ основными положеніями механики? Въ началѣ статьи мы уже говорили о принципѣ относительности въ механикѣ; теперь мы приведемъ его еще разъ.

„Между всѣми системами, которыя имѣютъ другъ относительно друга постоянную скорость, ни одна не выдѣляется по сравненію съ другой: относительно каждой системы такой группы всѣ процессы протекаютъ совершенно одинаковымъ образомъ. Но между всѣми группами группа неподвижныхъ звѣздъ занимаетъ исключительное положеніе: представить факты простымъ образомъ можно лишь при томъ условіи, если мы какую-нибудь систему этой группы будемъ разсматривать, какъ находящуюся въ покоѣ; но совершенно безразлично, какую мы выберемъ систему этой группы“. Или представимъ это еще

http://mathesis.ru

разъ въ наглядной формѣ перваго положенія: „предположимъ, что въ то время, какъ наблюдатель спитъ, весь его собственный міръ получаетъ постоянную скорость относительно „внѣшняго“ міра. Наблюдатель никогда не узнаетъ, что произошло во время его сна, если область его наблюденій ограничена его собственнымъ міромъ“. (Положеніе *A*).

Все это вполнѣ согласуется съ принципомъ Лоренца-Эйнштейна. Различіе выступитъ лишь, когда мы спросимъ, какъ будетъ судить наблюдатель, оставшійся въ покоющемся „внѣшнемъ“ мірѣ, о процессахъ въ мірѣ, пришедшемъ въ движеніе. Этотъ вопросъ до сихъ поръ не былъ поставленъ въ механикѣ, потому что отвѣтъ казался самоочевиднымъ.

„Онъ судитъ (принимая, конечно, въ разсчетъ взаимное перемѣщеніе) точно такимъ же образомъ, какъ наблюдатель, находящійся въ движеніи, предполагая, что онъ пользуется вѣрными инструментами. Но инструменты вѣрны или невѣрны независимо отъ всего этого. Поэтому онъ вправѣ выбрать и дѣйствительно выберетъ для измѣренія тѣ инструменты, при помощи которыхъ онъ измѣрилъ свой собственный міръ — „внѣшній міръ“. (Положеніе *B*).

Но принципъ Лоренца-Эйнштейна отвѣчаетъ: „при пользованіи совершенно тѣми же

http://mahesis.ru

инструментами онъ неправильно измѣритъ движущійся міръ, — точнѣе говоря: иначе, чѣмъ движущійся наблюдатель. Доставляемыя этими инструментами показанія длины и времени сперва должны быть переоцѣнены изложеннымъ выше образомъ; тогда лишь получатся одинаковые результаты". (Положеніе *C*).

Есть ли надежда, несмотря на эту противоположность, найти единый принципъ для всей физики? Примѣнить положеніе *B* къ электродинамикѣ не представляется возможнымъ: въ виду того, что распространеніе свѣта въ вакуумѣ равномѣрно для обоихъ наблюдателей, положенія *A* и *B* взаимно исключаютъ одно другое. Поэтому остается лишь приписать положенію *C* совершенно всеобщую силу.

Мы уже видѣли, что ни одинъ опытъ механики не противорѣчитъ ему; но онъ подрываетъ всѣ основныя понятія механики.

Величины пространства и времени уже не могутъ быть опредѣлены однозначнымъ образомъ и независимо однѣ отъ другихъ. Понятіе твердаго тѣла становится относительнымъ: оно зависитъ отъ наблюдателя. Но дальше: масса тѣла тоже не есть величина постоянная; она зависитъ отъ движенія тѣла относительно наблюдателя. Объ этомъ мы скажемъ еще нѣсколько словъ.

http://mathesis.ru

Ньютоновъ законъ движенія для свободной матеріальной точки гласитъ: „сила = масса $\times$ ускореніе“. Онъ провѣренъ для малыхъ скоростей (малыхъ относительно скорости свѣта). Предположимъ теперь, что онъ вполнѣ вѣренъ для какого-нибудь наблюдателя, когда матеріальная точка изъ покоя относительно наблюдателя переходитъ въ движеніе. Предположимъ, что точка достигла нѣкоторой скорости v; тогда она въ этотъ моментъ находится въ покоѣ относительно другой системы сравненія, а именно относительно той, которая обладаетъ какъ разъ скоростью v относительно наблюдателя. Согласно принципу относительности въ этой системѣ сравненія старый законъ неизмѣнно сохраняетъ силу. Но для наблюдателя законъ уже не имѣетъ силы въ своемъ прежнемъ видѣ: для наблюдателя длины и времена, а, слѣдовательно, также скорости и ускоренія выражаются инымъ образомъ. Эти измѣненія и значенія мы можемъ указать съ точностью. Силы тоже будутъ имѣть для наблюдателя другое выраженіе; но этого послѣдняго мы, вообще, не можемъ указать: новая механика должна насъ раньше научить этому выраженію. Въ одномъ только случаѣ мы можемъ указать это выраженіе, а именно — въ случаѣ электрическихъ силъ, потому что

http://mathesis.ru

здѣсь выраженіе для силъ находится въ тѣснѣйшей связи съ уравненіями, изъ которыхъ вытекаетъ распространеніе свѣта. Въ этомъ случаѣ намъ, слѣдовательно, извѣстны въ Ньютоновомъ уравненіи какъ „ускореніе", такъ и „сила" въ ихъ зависимости отъ скорости матеріальной точки относительно наблюдателя, и, слѣдовательно, намъ извѣстна также и „масса". Оказывается, что масса в о з р а с т а е т ъ съ скоростью. Приращеніе оказывается исчезающе малымъ даже для скорости земли по ея орбитѣ вокругъ солнца. Но если мы представимъ себѣ подобное движеніе точки, происходящее со скоростью, которая равна $^3/_4$ скорости свѣта, то ея масса при движеніи превышаетъ уже въ $1^1/_2$ раза массу, которой она обладаетъ въ покоѣ.

По милости Фортуны намъ извѣстно нѣчто такое, что можетъ получить такія и даже еще большія скорости, и что движется подъ вліяніемъ э л е к т р и ч е с к и х ъ силъ: это такъ называемые электроны, очень маленькія частицы, имѣющія отрицательный электрическій зарядъ; физики познакомились съ ними въ катодныхъ лучахъ, а потомъ онѣ были открыты также въ излученіи радіоактивныхъ тѣлъ. Въ этихъ двухъ видахъ онѣ были подвергнуты изслѣдованію, которое должно было рѣшить, измѣняется ли ихъ масса.

http://mathesis.ru

Новѣйшіе *) опыты были произведены — относительно радіевыхъ лучей Бухереромъ (Bucherer), — относительно катодныхъ лучей Гупка (Hupka). Оба они примѣнили существенно различные методы изслѣдованія; но все-таки пришли къ одинаковому заключенію: масса измѣняется, и при томъ измѣненія въ точности соотвѣтствуютъ принципу относительности.

Итакъ, первая попытка распространить принципъ Лоренца-Эйнштейна на механику дала положительный результатъ **) Изслѣдователи ревностно ищутъ новыхъ случаевъ, которые дали бы возможность продолжать провѣрку. Предположимъ, что принципъ получитъ полное подтвержденіе. Тогда физика измѣнится до самаго своего основанія: ея прежнія фундаментальныя понятія, какъ постоянная масса и твердое тѣло, будутъ разжалованы въ практически

---

*) Этотъ докладъ былъ читанъ 11 февраля 1910 г.

Ред.

**) Нужно, однако, замѣтить, что первыя весьма тщательныя изслѣдованія быстрыхъ движеній электроновъ, произведенныя Кауфманомъ, указали, правда, на увеличеніе массы, но оно не было равно въ точности той величинѣ, которая требовалась принципомъ относительности. Полнаго объясненія противорѣчія между наблюденіями пока еще не дано.

http://mathesis.ru

годныя приближенія. Такимъ образомъ, обнаружится, что міровое зданіе не столь просто, какъ намъ казалось. Но наша картина міра станетъ болѣе цѣлостной, чѣмъ раньше: электричество и механика сольются въ ней въ одно цѣлое, но наиболѣе тонкія ея черты будутъ имѣть электрическое происхожденіе.

http://mathesis.ru

ПРИЛОЖЕНІЕ*).

Принципъ относительности требуетъ, чтобы распространеніе свѣта въ пустомъ пространствѣ удовлетворяло слѣдующимъ условіямъ:

1) Оно должно представлять собой одинаковый процессъ для всѣхъ системъ группы неподвижныхъ звѣздъ, т. е. оно должно происходить сферическими волнами съ опредѣленной скоростью $c = 300\,000$ *км./сек.*

2) Между всѣми системами группы неподвижныхъ звѣздъ ни одна не имѣетъ исключительнаго положенія, т. е. мы съ совершенно одинаковымъ правомъ можемъ считать, либо что система S' движется съ скоростью v относительно системы S въ опредѣленномъ направленіи, либо

*) Изъ источниковъ назовемъ прежде всего: A. Einstein, „Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik", B. 4, 1907.

http://mathesis.ru

же что система S движется относительно системы S' съ скоростью v въ противоположномъ направленіи.

Математическая формулировка гласитъ: если обозначимъ черезъ t, x, y, z время и координаты въ системѣ S, черезъ t', x', y', z' время и координаты въ системѣ S', и если система S' обладаетъ относительно системы S скоростью v въ направленіи возрастающихъ координатъ x и x', при чемъ оси y-овъ и z-овъ должны быть палельны соотвѣтственно осямъ y'-овъ и z'-овъ, то:

1) уравненіе $x^2+y^2+z^2=c^2t^2$ должно быть тождественно съ уравненіемъ $x'^2+y'^2+z'^2=$ $=c^2t'^2$, и

2) уравненія, выражающія перемѣнныя t', x', y', z' черезъ t, x, y, z, должны превратиться въ уравненія, выражающія t, x, y, z черезъ t', x', y', z', если замѣнимъ скорость v черезъ $-v$.

Рѣшеніе этой задачи, какъ легко провѣрить, гласитъ:

$$t'=k\left(t-\frac{v}{c^2}x\right), \qquad (a)$$

$$t=k\left(t'+\frac{v}{c^2}x'\right), \qquad (b)$$

$$x'=k(x-vt), \qquad (c)$$

$$x=k(x'+vt'), \qquad (d)$$

$$y'=y, \qquad z'=z,$$

http://mathesis.ru

гдѣ

$$k^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2}.$$

Эти уравненія содержатъ, во-первыхъ, все, что мы объяснили на модели. На модели $c = \frac{60\ см.}{7\frac{2}{3}h}$ и $\frac{v}{c} = \frac{3}{4}$; слѣдовательно, $k = \frac{3}{2}$ (въ круглыхъ числахъ). Предположимъ, что координаты t, x, y, z относятся къ небесной системѣ, а координаты t', x', y', z' — къ земной.

Мы показали, что эта скорость c имѣетъ мѣсто для распространенія свѣта въ направленіи $+x$ и въ направленіи $-x$ въ небесной системѣ, и въ направленіяхъ $+x'$ и $-x'$ въ земной системѣ. Мы замѣтили далѣе, что земные часы E_1 и E_2 не синхроничны для солнечнаго человѣка: для него часы E_2 отстаютъ сравнительно съ часами E_1 на $5^3/_4$ часовъ. Это значитъ: когда

$$t_1 = t_2, \quad t'_1 - t'_2 = 5\tfrac{3}{4}^h.$$

Но уравненіе (b) показываетъ: если $t_1 = t_2$, то

$$t'_1 + \frac{v}{c^2} x'_1 = t'_2 + \frac{v}{c^2} x'_2,$$

или

$$t'_1 - t'_2 = \frac{v}{c^2}(x'_2 - x'_1) = \frac{3}{4}\cdot\frac{7\frac{2}{3}}{60}\cdot 60^h = 5\tfrac{3}{4}^h,$$

http://mathesis.ru

такъ какъ

$$x'_2 - x'_1 = 60 \text{ см.}$$

Мы показали далѣе, что человѣкъ солнца, переносящій въ одинаковыя времена t свои марки отъ точекъ „0“ и „60 *см.*“ солнечнаго масштаба, отложитъ на земномъ масштабѣ 90 *см.* Теперь изъ уравненія (c) вытекаетъ: при $t_1 = t_2$ имѣетъ мѣсто уравненіе

$$x'_2 - x'_1 = k\,(x_2 - x_1) = \tfrac{3}{2} \cdot 60 \text{ см.} = 90 \text{ см.}$$

Обратно: человѣкъ земли, переносящій въ одинаковыя времена t' свои марки отъ точекъ „0“ и „60 *см.*“ земного масштаба, отложитъ на небесномъ масштабѣ 90 *см.* Но изъ уравненія (d) при $t'_1 = t'_2$ вытекаетъ:

$$x_2 - x_1 = k\,(x'_2 - x'_1) = \tfrac{3}{2} \cdot 60 \text{ см.} = 90 \text{ см.}$$

Мы показали, что процессу, происходящему въ опредѣленной точкѣ земли, т. е. при опредѣленномъ значеніи x', и продолжающемуся здѣсь 7 часовъ, человѣкъ солнца припишетъ продолжительность въ $10^1/_2$ часовъ. Теперь изъ уравненія (b) вытекаетъ при $x'_1 = x'_2$:

$$t_2 - t_1 = k\,(t'_2 - t'_1) = \tfrac{3}{2} \cdot 7^h = 10\tfrac{1}{2}^h.$$

http://mathesis.ru

Наконецъ, мы показали: совершенно такъ же судитъ человѣкъ земли о процессѣ, происходящемъ въ опредѣленной точкѣ на солнцѣ, т. е. при опредѣленномъ значенiи x, и продолжающемся тамъ 7 часовъ. Теперь изъ уравненiя (a) вытекаетъ при $x_1 = x_2$:

$$t'_2 - t'_1 = k(t_2 - t_1) = \tfrac{3}{2} \cdot 7^h = 10\tfrac{1}{2}^h.$$

До сихъ поръ рѣчь шла о модели. То, что мы въ текстѣ называемъ „переоцѣнкой", означаетъ слѣдующее: значенiе величины, выраженной въ зависимости отъ перемѣнныхъ t, x, y, z (т. е. такъ, какъ B наблюдаетъ ее въ системѣ S), выразить въ функцiи отъ t', x', y', z' (т. е. такъ, какъ B' наблюдаетъ ее въ системѣ S'). При этомъ имѣемъ для $v = 10$ *м./сек.* (текущая вода):

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{3.10^7}; \quad k = 1 + \frac{1}{18.10^{14}};$$

для $v = 30$ *км./сек.* (движенiе земли относительно солнца):

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{10^4}; \quad k = 1 + \frac{1}{2.10^8}.$$

Приложенiя въ текстѣ относятся къ скоростямъ. Пусть будетъ нѣкоторая скорость:

http://mathesis.ru

u съ составляющими

$$u_x = \frac{x}{t}, \quad u_y = \frac{y}{t}, \quad u_z = \frac{z}{t} \text{ въ системѣ } S,$$

u' съ составляющими

$$u'_x = \frac{x'}{t'}, \quad u'_y = \frac{y'}{t'}, \quad u'_z = \frac{z'}{t'} \text{ въ системѣ } S'.$$

Согласно уравненіямъ, приведеннымъ послѣ условія 2), имѣемъ:

$$\frac{x'}{t'} = \frac{x - vt}{t - \frac{v}{c^2}x}, \quad \frac{y'}{t'} = \frac{y}{k\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)}, \quad \frac{z'}{t'} = \frac{z}{k\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)};$$

или

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{v}{c^2}u_x}, \quad u'_y = \frac{u_y}{k\left(1 - \frac{v}{c^2}u_x\right)},$$

$$u'_z = \frac{u_z}{k\left(1 - \frac{v}{c^2}u_x\right)}.$$

1) (Фиг. 10). Предположимъ, что относительно излучающей неподвижной звѣзды (S) земля (S') движется со скоростью v въ направленіи x перпендикулярно къ прямой y, соединяющей эти двѣ системы*). Какова скорость и направленіе излу-

---

*) Мы ограничимся этимъ случаемъ, и вмѣстѣ съ тѣмъ мы для упрощенія не будемъ принимать во вниманіе движенія всей солнечной системы относительно неподвижной звѣзды; v обозначаетъ въ такомъ случаѣ скорость земли по ея орбитѣ вокругъ солнца.

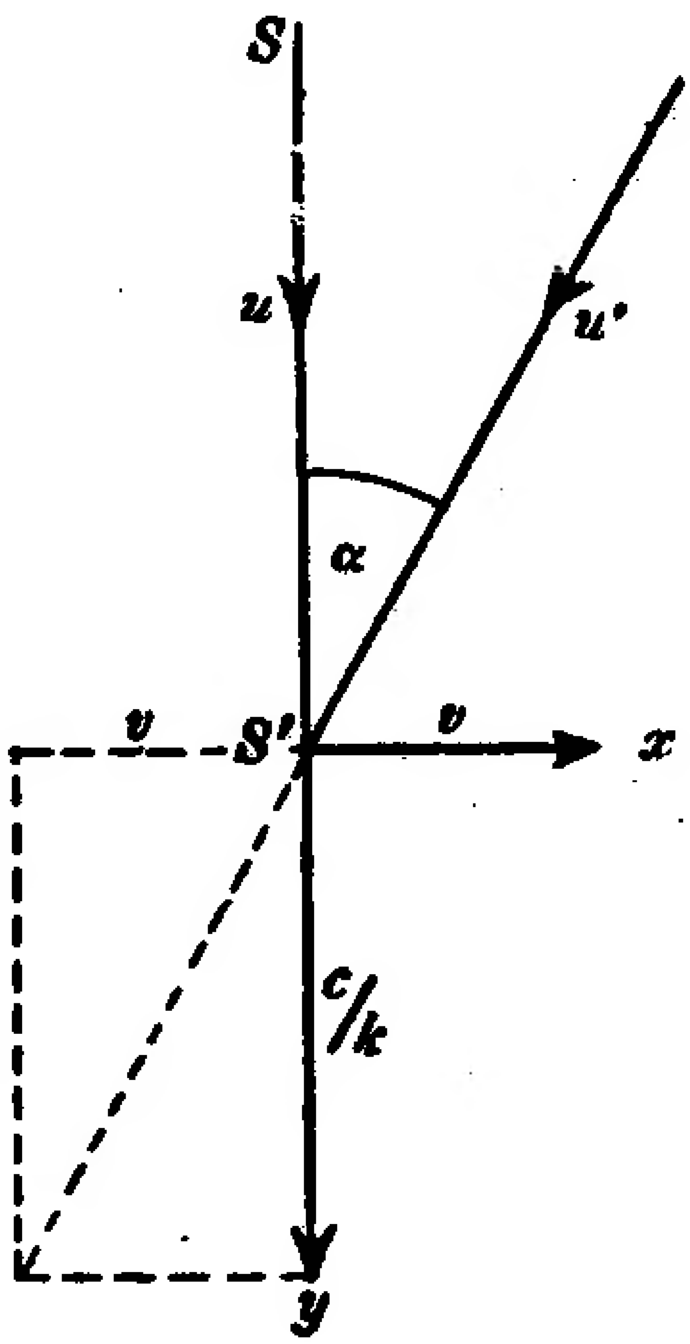
http://mathesis.ru

ченія, наблюдаемыя обитателемъ земли? Для обитателя неподвижной звѣзды

$$u_x = 0, \quad u_y = c, \quad u_z = 0.$$

Отсюда:

$$u'_x = -v, \quad u'_y = \frac{c}{k}, \quad u'_z = 0.$$



Фиг. 10.

Слѣдовательно,

$$u'^2 = v^2 + \frac{c^2}{k^2} = c^2, \quad \text{или} \quad u' = c = u.$$

Но (см. фиг. 10)

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{u'_x}{u'_y} = k\frac{v}{c}.$$

http://mathesis.ru

Уголъ аберраціи a элементарнымъ образомъ получается изъ уравненія $\operatorname{tg} a = v/c$. На основаніи наблюденія мы не имѣемъ возможности сдѣлать выборъ между этими двумя значеніями.

2) Предположимъ, что черезъ жидкость (S), текущую со скоростью w въ направленіи x, пропускается свѣтъ въ этомъ же направленіи. Скорость его распространенія въ системѣ S равна $u_x = q = c/n$, гдѣ n есть показатель преломленія: $u_y = u_z = 0$. Слѣдовательно, для наблюдателя, находящагося въ покоѣ въ системѣ S', имѣемъ: $(v = -w)$

$$q' = u'_x = \frac{q + w}{1 + \frac{wq}{c^2}},$$

или также, въ виду чрезвычайно малаго значенія дроби w/c:

$$q' = q + w - w\frac{q^2}{c^2} = q + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) w.$$

Но таковъ именно результатъ опытовъ Физо.

http://mathesis.ru

http://mathesis.ru

Новая механика*).

Г. Пуанкаре.

Я долженъ извиниться, что принужденъ сегодня говорить по-французски. Хотя на предыдущихъ моихъ докладахъ я объяснялся по-нѣмецки, но объяснялся слишкомъ плохо: говорить на чужомъ языкѣ такъ же трудно,какъ хромому ходить: необходимы костыли; до сихъ поръ моими костылями были математическія формулы, и вы не можете себѣ представить, какая это поддержка для оратора, который встрѣчаетъ затрудненія въ выраженіи своихъ мыслей. Сегодня я не хочу пользоваться формулами, я остаюсь безъ костылей и вотъ почему долженъ говорить по-французски.

Всѣмъ извѣстно, что на свѣтѣ нѣтъ ничего неизмѣнно установленнаго, неразрушимаго; самыя великія, могущественныя государства не вѣчны: это излюбленная тема пророковъ. Научныя теоріи такъ же, какъ и государства, не могутъ быть увѣ-

*) Послѣдняя изъ шести лекцій, прочитанныхъ авторомъ въ Гёттингенѣ по приглашенію Гёттингенскаго Ученаго Общества.

http://mathesis.ru

рены въ завтрашнемъ днѣ. Врядъ ли вы найдете другую теорію, которая казалась бы менѣе подверженной разрушительной силѣ времени, чѣмъ механика Ньютона; она была общепризнанной; этому зданію, казалось, не угрожала гибель; но вотъ и оно, въ свою очередь, я не скажу, повергнуто въ прахъ,—это было бы преждевременно,—но, во всякомъ случаѣ, сильно пострадало подъ ударами великихъ разрушителей: одинъ изъ нихъ, Максъ Абрагамъ, находится среди васъ, другой—голландскій физикъ Лоренцъ. Я хотѣлъ бы сказать вамъ нѣсколько словъ о развалинахъ стараго зданія и о новой постройкѣ, которую хотятъ воздвигнуть на его мѣстѣ.

Итакъ, что же характеризовало старую механику? Слѣдующій простой фактъ: я беру тѣло, находящееся въ покоѣ, и сообщаю ему толчекъ,—другими словами, я прилагаю къ нему въ продолженіе опредѣленнаго времени опредѣленную силу; тѣло приходитъ въ движеніе и пріобрѣтаетъ нѣкоторую скорость; къ тѣлу, обладающему уже этой скоростью, прилагаемъ снова ту же силу въ продолженіе такого же времени,—скорость удвоится; и если мы будемъ это повторять, то скорость утроится, послѣ того какъ мы сообщимъ ему такой же толчекъ въ третій разъ. Если этотъ опытъ производить значительное количество разъ, то тѣло пріобрѣтаетъ, наконецъ, очень большую

http://mathesis.ru

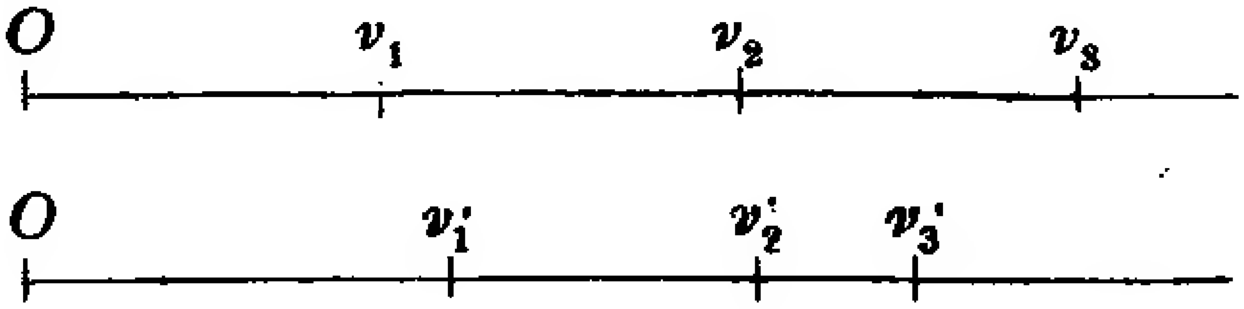
скорость, которая можетъ превзойти всякія границы,— безконечную скорость.

Въ новой механикѣ, наоборотъ, предполагаютъ, что тѣлу, выведенному изъ равновѣсія, невозожно сообщить скорость, превосходящую скорость свѣта. Дѣло здѣсь заключается въ слѣдующемъ: я беру то же самое тѣло, находящееся въ покоѣ, и сообщаю ему первый толчекъ; оно получаетъ ту же скорость, что и въ предыдущемъ случаѣ; возобновляемъ вторично этотъ толчекъ, скорость еще увеличивается, но не удвоится; третій толчекъ дастъ аналогичные результаты: скорость увеличивается, но все менѣе и менѣе,—тѣло оказываетъ сопротивленіе, которое постепенно возрастаетъ. Это сопротивленіе, или инерцію, обыкновенно называютъ массой; въ новой механикѣ все происходитъ такъ, какъ будто бы масса тѣлъ была не постоянной, а возрастала вмѣстѣ со скоростью. Мы можемъ представить явленія графически: въ старой механикѣ тѣло послѣ перваго толчка получаетъ скорость, представленную отрѣзкомъ Ov_1 (см. рис.); послѣ второго толчка Ov_1 увеличивается на отрѣзокъ v_1v_2, который равенъ первому; съ каждымъ новымъ толчкомъ скорость увеличивается въ одинаковой степени, и отрѣзокъ, представляющій это увеличеніе, имѣетъ постоянную длину; въ новой механикѣ первый отрѣзокъ, изображающій скорость, увеличивается на отрѣзки $v_1'v_2'$,

http://mathesis.ru

$v_2'v_3'$, которые становятся все меньше и меньше, но такимъ образомъ, что сумма не можетъ превзойти опредѣленнаго предѣла скорости.

Что же привело къ этимъ выводамъ? Дѣлались ли непосредственные опыты? Разногласіе между обѣими теоріями можетъ обнаружиться лишь при наблюденіи тѣлъ, движущихся съ весьма большой скоростью; только въ этомъ случаѣ указанныя выше различія сдѣлаются замѣтными. Но что называть большой скоростью? Скорость ли автомобиля, который мчится по городу, дѣлая 100 *км.* въ часъ? Но съ нашей точки зрѣнія это скорость



улитки. Значительно большія скорости мы найдемъ въ астрономіи: Меркурій, самое быстрое изъ небесныхъ тѣлъ, проходитъ также около 100 *км.*, только не въ часъ, а въ секунду; тѣмъ не менѣе и эта скорость недостаточно велика, чтобы обнаружить тѣ различія, которыя мы хотимъ наблюдать. Я уже не говорю о пушечныхъ ядрахъ— они летятъ быстрѣе автомобиля, но значительно медленнѣе Меркурія; однако, вы знаете, что открыта новая артиллерія, ядра которой быстрѣе пушечныхъ: я говорю о радіи, который посылаетъ

http://mathesis.ru

во всѣ направленія энергію, ядра; быстрота снарядовъ здѣсь несравненно большая, первоначальная скорость ихъ составляетъ 100 000 *км.* въ секунду, т. е. треть скорости свѣта; объемъ этихъ ядеръ и ихъ вѣсъ, правда, весьма незначительны, и мы не должны надѣяться, что эта артиллерія увеличитъ военное могущество нашихъ армій. Но возможны ли опыты съ этими ядрами? Такіе опыты были, дѣйствительно, предприняты; подъ вліяніемъ электрическаго поля и магнитнаго поля происходитъ отклоненіе, которое позволяетъ установить существованіе инерціи и измѣрить ее. Такимъ образомъ было обнаружено, что масса зависитъ отъ скорости, и установленъ указанный выше законъ механики: инерція тѣла возрастаетъ съ его скоростью, которая всегда остается менѣе скорости свѣта, т. е. 300 000 *км.* въ секунду.

Теперь я перехожу ко второму принципу — принципу относительности. Предположимъ, что какой-нибудь наблюдатель подвигается вправо; все происходитъ въ его глазахъ такъ, какъ будто онъ остается въ покоѣ, предметы же, которыми онъ окруженъ, перемѣщаются влѣво: нѣтъ никакой возможности опредѣлить, перемѣщаются ли дѣйствительно предметы, или движется самъ наблюдатель. Объ этомъ говорится во всѣхъ учебникахъ механики; въ нихъ всегда приводится примѣръ путешественника, ѣдущаго по рѣкѣ на

http://mathesis.ru

кораблѣ; ему кажется, что берега рѣки проносятся передъ нимъ, а корабль его неподвиженъ. При болѣе глубокомъ изслѣдованіи этотъ простой фактъ пріобрѣтаетъ важное значеніе; нѣтъ никакихъ средствъ для рѣшенія вопроса объ абсолютномъ движеніи; никакимъ опытомъ нельзя опровергнуть принципа, что нѣтъ абсолютнаго пространства и что только относительныя движенія доступны нашему наблюденію. Я когда-то мимоходомъ высказалъ эти соображенія, хорошо знакомыя всѣмъ философамъ, и даже этимъ пріобрѣлъ извѣстность, отъ которой охотно отказался бы: всѣ реакціонныя французскія газеты приписывали мнѣ, будто я доказалъ, что солнце вращается вокругъ земли; въ знаменитомъ процессѣ Галилея съ инквизиціей вся вина оказывалась, такимъ образомъ, на сторонѣ Галилея.

Возвратимся къ старой механикѣ: она допускаетъ принципъ относительности; ея законы вмѣсто того, чтобы быть основанными на опытахъ, были выведены изъ этого основного принципа. Этихъ принциповъ было достаточно для объясненія чисто механическихъ явленій; но въ примѣненіи къ нѣкоторымъ важнымъ отдѣламъ физики — напримѣръ, къ оптикѣ — они уже отказывались служить. За абсолютную принималась скорость свѣта относительно эѳира: эту скорость можно было измѣрить, и, слѣдовательно, теоретически

http://mathesis.ru

существовала возможность сравнивать движеніе всякаго тѣла съ абсолютнымъ движеніемъ, т. е. существовала возможность установить, находится ли тѣло въ абсолютномъ движеніи или нѣтъ.

Такіе опыты съ чрезвычайно точными приборами, которыхъ я не стану вамъ описывать, были совершены съ цѣлью осуществить это сравненіе на практикѣ; они не дали никакихъ результатовъ. Принципъ относительности въ новой механикѣ не допускаетъ никакихъ ограниченій; онъ имѣетъ, если можно такъ выразиться, абсолютное значеніе.

Чтобы выяснить роль, которую играетъ принципъ относительности въ новой механикѣ, намъ, нужно сначала познакомиться съ остроумнымъ понятіемъ, введеннымъ физикомъ Лоренцомъ, съ такъ называемымъ мѣстнымъ временемъ. Представимъ себѣ двухъ наблюдателей — одного A въ Парижѣ, другого B въ Берлинѣ. A и B имѣютъ одинаковые хронометры, которые они хотятъ установить; но наши наблюдатели необычайно педантичны, они требуютъ отъ установки чрезвычайной точности. Они хотятъ, напримѣръ, чтобы показанія ихъ хронометровъ не могли отличаться болѣе, чѣмъ на одну милліардную долю секунды. Чтобы быть вполнѣ современными, допустимъ, что A посылаетъ изъ Парижа въ Берлинъ сигналъ по безпроволочному телеграфу. B отмѣчаетъ моментъ полученія сигнала; этотъ мо-

http://mathesis.ru

ментъ и будетъ для обоихъ хронометровъ началомъ времени. Но сигналу нужно нѣкоторое время, чтобы дойти отъ Парижа до Берлина, онъ передается со скоростью свѣта; B, конечно, понимаетъ, что благодаря этому часы его будутъ опаздывать, и постарается исправить ошибку. Дѣло, повидимому, очень просто: достаточно, чтобы A, въ свою очередь, получилъ сигналъ отъ B; взявши среднюю ариѳметическую изъ двухъ отмѣтокъ, оба наблюдателя установятъ вполнѣ точное соотвѣтствіе между своими часами. Но такъ ли это? Мы допускаемъ, что сигналъ отъ A къ B идетъ столько же времени, какъ и обратно. А между тѣмъ земля уноситъ обоихъ наблюдателей въ своемъ движеніи по отношенію къ эѳиру, по которому распространяются электрическія волны. Пославши свой сигналъ, A несется за нимъ, а B отъ него удаляется,—время, необходимое для передачи сигнала, въ данномъ случаѣ болѣе, чѣмъ если оба наблюдателя находятся въ покоѣ. Напротивъ, отъ B къ A сигналъ передается скорѣе, такъ какъ A движется ему навстрѣчу: такимъ образомъ, нѣтъ никакой возможности установить, показываютъ ли оба хронометра одно и то же время или нѣтъ. Какой бы ни примѣнять способъ, затрудненія останутся тѣ же; астрономическія наблюденія, какъ и всякій оптическій методъ, сталкивается съ тѣми же препятствіями; B до-

http://mathesis.ru

ступна лишь видимая разность времени, такъ сказать, мѣстное время. Принципъ относительности остается въ полной силѣ.

Однако, въ старой механикѣ при помощи этого принципа доказывались всѣ основные законы. По примѣру классическихъ разсужденій можно было бы попытаться разсуждать слѣдующимъ образомъ. Положимъ, что передъ нами два наблюдателя, которымъ мы попрежнему, согласно принятому въ математикѣ обыкновенію, дадимъ имена A и B; положимъ, что они движутся, удаляясь одинъ отъ другого; ни одинъ изъ нихъ не можетъ обладать скоростью большею, чѣмъ скорость свѣта; пусть B, напримѣръ, дѣлаетъ 200 000 *км.* въ секунду вправо, A — столько же влѣво. A можетъ считать, что онъ находится въ покоѣ, но тогда онъ долженъ приписать B скорость въ 400 000 *км.* Если A знаетъ новую механику, онъ скажетъ себѣ: B обладаетъ скоростью, которой онъ не можетъ достигнуть; необходимо, слѣдовательно, допустить, что и я нахожусь въ движеніи. Такимъ образомъ, у A, повидимому, есть данныя для выясненія своего абсолютнаго движенія. Но для этого ему необходимо наблюдать движеніе B; чтобы сдѣлать это наблюденіе, A и B прежде всего устанавливаютъ свои хронометры, затѣмъ B посылаетъ A телеграммы, чтобы сообщать ему о своихъ послѣ-

http://mathesis.ru

довательныхъ мѣстонахожденіяхъ; A, такимъ образомъ, можетъ отдать себѣ отчетъ въ движеніи B и начертить кривую этого движенія. Однако, сигналы передаются со скоростью свѣта: часы, которые показываютъ кажущееся время, постоянно мѣняются, и все происходитъ, какъ если бы часы у B уходили впередъ. B будетъ казаться, что онъ движется гораздо медленнѣе, и его относительная скорость по отношенію къ A никогда не превзойдетъ величины, которой она не должна достигнуть. Ничто не въ состояніи открыть наблюдателю, находится ли онъ въ движеніи или въ абсолютномъ покоѣ.

Нужно сдѣлать еще третью гипотезу, еще болѣе странную и трудно допустимую, такъ какъ она плохо вяжется съ нашими обычными представленіями. Всѣ тѣла во время движенія измѣняютъ форму, сжимаясь въ направленіи движенія: шаръ преобразовывается, напримѣръ, въ тѣло, похожее на приплюснутый эллипсоидъ, ось котораго параллельна движенію. Мы не замѣчаемъ этого измѣненія на каждомъ шагу вслѣдствіе его незначительности. Земля въ своемъ движеніи по орбитѣ измѣняетъ свою форму приблизительно на $^1/_{200\,000\,000}$; чтобы наблюдать это явленіе, нужны были бы приборы чрезвычайной точности; но, если бы даже ихъ точность была безконечна,

то и тогда мы ничего не выиграли бы, такъ какъ вслѣдствіе того же движенія они точно такъ же измѣняли бы свою форму. Ничего нельзя будетъ замѣтить: метръ, которымъ мы могли бы измѣрять, будетъ становиться короче вмѣстѣ съ длиной, которую мы измѣряемъ. Можно узнать что-нибудь опредѣленное объ измѣненіи формы тѣлъ, лишь сравнивая длину этихъ тѣлъ со скоростью свѣта. Это осуществлено тонкими опытами Майкельсона, на подробномъ описаніи которыхъ я не буду останавливаться; они привели къ высшей степени замѣчательнымъ результатамъ: какъ бы удивительны ни показались эти результаты, но слѣдуетъ согласиться, что третья гипотеза вполнѣ провѣрена. Таковы основы новой механики; при допущеніи указанныхъ гипотезъ она оказывается совмѣстимой съ принципомъ относительности. Но ее нужно еще связать съ новѣйшими воззрѣніями на вещество.

Для современнаго физика атомъ уже не представляется простымъ элементомъ; онъ сталъ настоящимъ міркомъ, въ которомъ тысячи планетъ вращаются вокругъ крошечныхъ солнцъ. Солнцами и планетами здѣсь служатъ отрицательно или положительно наэлектризованныя частицы; физикъ ихъ называетъ электронами и изъ нихъ создаетъ весь міръ. Нѣкоторые представляютъ себѣ атомъ, какъ центральную положительную

http://mathesis.ru

массу, вокругъ которой движется большое число отрицательно заряженныхъ электроновъ, общая масса которыхъ равна по величинѣ массѣ центральнаго ядра.

Этотъ взглядъ на матерію позволяетъ легко объяснить увеличеніе массы тѣла съ его скоростью, которое мы отмѣтили, какъ одно изъ основныхъ положеній новой механики. Такъ какъ тѣло представляетъ собой совокупность электроновъ, то достаточно разсмотрѣть движенія этихъ послѣднихъ. Но извѣстно, что движеніе отдѣльнаго электрона въ эѳирѣ производитъ электрическій токъ, т. е. электромагнитное поле. Этому полю соотвѣтствуетъ нѣкоторое количество энергіи, находящееся не въ электронѣ, а въ эѳирѣ. Измѣненіе величины или направленія скорости электрона сопровождается измѣненіемъ электромагнитной энергіи эѳира. Между тѣмъ какъ въ Ньютоновой механикѣ вся затрачиваемая энергія идетъ на преодолѣніе инерціи движущагося тѣла, здѣсь часть энергіи уходитъ на преодолѣніе того, что можно назвать инерціей эѳира относительно электромагнитныхъ силъ. Инерція эѳира возрастаетъ вмѣстѣ со скоростью и становится безконечно большой, когда скорость электрона приближается къ скорости свѣта. Такимъ образомъ, кажущаяся масса электрона возрастаетъ вмѣстѣ со скоростью; опыты Кауфмана показываютъ, что постоянная дѣйствительная масса электрона такъ

http://mathesis.ru

ничтожна по сравненію съ его кажущейся массой, что ее можно считать равной нулю.

Итакъ, согласно новымъ воззрѣніямъ постоянной массы болѣе не существуетъ. Инерціей обладаетъ не матерія, а эѳиръ; онъ одинъ оказываетъ сопротивленіе движенію, такъ что можно было бы сказать: нѣтъ матеріи, есть только дыры въ эѳирѣ. Для движеній установившихся или почти установившихся новая механика, съ той степенью точности, которую допускаютъ наши измѣренія, не отличается отъ механики Ньютона; разница только въ томъ, что масса зависитъ отъ скорости, и отъ угла между скоростью и направленіемъ ускоряющей силы. Напротивъ, значительныя измѣненія скоростей, — напримѣръ, очень быстрыя колебанія, — производятъ волны Герца, которыя поглощаютъ часть энергіи электрона, замедляя этимъ его движенія. Такъ, въ безпроволочномъ телеграфѣ распространеніе волнъ вызывается колебаніями электроновъ при колебательномъ разрядѣ.

Подобныя колебанія происходятъ въ пламени, а также и въ раскаленномъ твердомъ тѣлѣ. По теоріи Лоренца внутри раскаленнаго тѣла движется огромное число электроновъ, которые, не имѣя возможности выйти изъ него, летаютъ во всѣхъ направленіяхъ и отражаются на его поверхности. Ихъ можно сравнить со множе-

http://mathesis.ru

ствомъ мошекъ, пойманныхъ въ банку, которыя бьются крыльями о стѣнки своей тюрьмы. Чѣмъ выше температура, тѣмъ быстрѣе движенiе электроновъ и тѣмъ чаще ихъ взаимныя столкновенiя и отраженiя на поверхности. Электромагнитныя волны, которыя возникаютъ отъ этихъ столкновенiй и отраженiй, вызываютъ въ насъ ощущенiе, что тѣло раскалено.

Движенiе электроновъ почти осязаемо въ трубкѣ Крукса. Въ ней происходитъ настоящая бомбардировка электронами со стороны катода. Эти катодные лучи сильно ударяютъ антикатодъ и, частично отражаясь, производятъ электромагнитное колебанiе, которое многiе физики уподобляютъ Рентгеновскимъ лучамъ.

Намъ остается еще разсмотрѣть отношенiе новой механики къ астрономiи. Что станетъ съ закономъ Ньютона послѣ исчезновенiя понятiя о постоянной массѣ тѣлъ? Этотъ законъ останется въ силѣ только для тѣлъ, находящихся въ покоѣ. Также придется считаться и съ тѣмъ, что притяженiе не мгновенно. Такимъ образомъ, естественно задать себѣ вопросъ, не послужитъ ли новая механика только къ усложненiю астрономiи, не достигнувъ большей точности, чѣмъ классическая небесная механика. Лоренцъ изслѣдовалъ этотъ вопросъ. Допуская правильность закона Ньютона для двухъ наэлектризованныхъ тѣлъ,

http://mathesis.ru

находящихся въ покоѣ, онъ вычисляетъ электродинамическое дѣйствіе токовъ, производимыхъ этими тѣлами при движеніи; такимъ образомъ, онъ открываетъ новый законъ притяженія двухъ тѣлъ, зависящій отъ ихъ скоростей. Прежде, чѣмъ разсмотрѣть, какъ этотъ законъ объясняетъ астрономическія явленія, замѣтимъ еще, что ускореніе движенія небесныхъ тѣлъ имѣетъ слѣдствіемъ электромагнитное лучеиспусканіе, и, благодаря проистекающей отсюда потерѣ энергіи, должно происходить постепенное уменьшеніе ихъ скоростей. Современемъ планеты упадутъ на солнце, но эта мысль не должна насъ устрашать,—катастрофа не можетъ произойти раньше, какъ черезъ милліонъ милліардовъ вѣковъ. Возвращаясь къ закону тяготѣнія, мы ясно видимъ, что разница между обѣими механиками будетъ тѣмъ большей, чѣмъ больше скорость планетъ. Наибольшая разница должна обнаружиться въ теоріи движенія Меркурія, самой быстрой изъ всѣхъ планетъ. Дѣйствительно, движеніе Меркурія представляетъ еще одну необъясненную до сихъ поръ аномалію: движеніе его въ перигеліи на 38″ быстрѣе движенія, вычисленнаго классической теоріей. *Леверье* приписывалъ эту аномалію планетѣ, которая еще не открыта, и одинъ астрономъ-любитель утверждалъ, что наблюдалъ ея прохожденіе черезъ солнце. Съ тѣхъ поръ никто

http://mathesis.ru

этой планеты не видѣлъ, и, къ сожалѣнію, не подлежитъ сомнѣнію, что замѣченная планета была не что иное, какъ птица. Новая механика нѣсколько исправляетъ ошибку въ теоріи движенія Меркурія, доводя ее до 32″, но не даетъ полнаго соотвѣтствія между наблюденіемъ и вычисленіемъ. Если этотъ результатъ не является рѣшающимъ въ пользу новой механики, то тѣмъ менѣе его можно считать неблагопріятнымъ для принятія ея, такъ какъ она все-же уменьшаетъ ошибку теоріи. Теорія другихъ планетъ не измѣнилась сколько-нибудь замѣтно въ новой механикѣ, и съ той степенью точности, съ какой производятся наблюденія, результаты ея совпадаютъ съ результатами классической механики.

Подводя итоги всему сказанному, я нахожу, что, несмотря на важное значеніе доказательствъ и фактовъ, выдвинутыхъ противъ классической механики, было бы преждевременно разсматривать ее, какъ окончательно осужденную. Какъ бы то ни было, она во всякомъ случаѣ останется механикой скоростей очень малыхъ по сравненію со скоростью свѣта, механикой нашей практической жизни и нашей земной техники. Однако же, если ея соперница восторжествуетъ черезъ нѣсколько лѣтъ, я позволю себѣ отмѣтить опасность, которая грозитъ преподаванію. Многіе учителя,—по крайней мѣрѣ, во Франціи,—излагая своимъ

http://mathesis.ru

ученикамъ элементарную механику, поспѣшатъ имъ сообщить, что эта механика отжила свой вѣкъ, и что новая механика, гдѣ понятія о массѣ и времени имѣютъ совсѣмъ другой смыслъ, ее замѣстила; они будутъ относиться свысока къ этой устарѣлой механикѣ, преподавать которую ихъ заставляютъ существующія программы, и внушатъ ученикамъ презрѣніе, которое они сами къ ней питаютъ. Я думаю, однако, что эта презираемая классическая механика будетъ такъ же необходима, какъ и теперь, и только тотъ, кто основательно изучитъ ее, въ состояніи будетъ понять новую механику.

http://mathesis.ru

http://mathesis.ru